

DOI: 10.20103/j.stxb.202404300972

彭小静, 黄海山, 严芝银, 邹星晨, 贺康宁, 程唱, 王作泉, 李睿, 刘婧雯, 石正阳, 刘仟仟. 祁连山东部地区不同林分密度白桦天然林土壤理化性质特征. 生态学报, 2025, 45(2): 743-756.

Peng X J, Huang H S, Yan Z Y, Zou X C, He K N, Cheng C, Wang Z X, Li R, Liu J W, Shi Z Y, Liu Q Q. Characteristics of soil physical and chemical properties of natural *Betula platyphylla* forests with different stand densities in the eastern Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 743-756.

祁连山东部地区不同林分密度白桦天然林土壤理化性质特征

彭小静^{1,2,3}, 黄海山⁴, 严芝银⁴, 邹星晨^{1,2,3}, 贺康宁^{1,2,3,*}, 程 唱^{1,2,3}, 王作泉^{1,2,3},
李 睿^{1,2,3}, 刘婧雯^{1,2,3}, 石正阳^{1,2,3}, 刘仟仟^{1,2,3}

1 北京林业大学水土保持学院水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

2 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083

3 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083

4 大通回族土族自治县宝库林场, 西宁 810100

摘要: 研究不同林分密度对白桦天然林土壤理化性质的影响, 分析不同林分密度下白桦天然林土壤理化性质的变化规律, 为白桦天然林的保护提供合理的密度参考。以青海省西宁市大通县宝库林区白桦天然次生林为研究对象, 通过采集土壤样品, 调查并测定了 100—400、400—700、700—1000、1000—1500、1500—2100、2100—2500 株/hm² 6 种密度下林地的土壤容重、质量含水量、田间持水量、孔隙度、饱和导水率(K_{st})、pH 值、有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)含量和包括 C:N、C:P、N:P 在内的共 17 个土壤属性指标, 采用 SPSS 22.0 对数据进行显著性检验和相关性分析。结果表明: (1) 在垂直分布特征上: 土壤孔隙度、 K_{st} 和 SOC、TN、TP、AN、AK 的含量, 以及 C:P、N:P 的比值均随土层深度增加而降低; 而土壤容重和 pH 值则随土层深度增加而增大。(2) 在密度分布特征上: 土壤 SOC、TN、AN 含量, C:P、N:P 的比值随密度增加呈缓慢降低的变化趋势, TP 含量随密度增加无显著变化规律, 以上这些指标均在密度为 100—400 株/hm² 时达到最大。土壤质量含水量、田间持水量、 K_{st} 和孔隙度均随密度增大呈先增后减的变化趋势, 且都在密度为 400—700 株/hm² 时达到最大, 土壤容重在 该密度时达到最小。(3) 在土壤化学计量特征上: 研究区土壤 C:P、N:P 的平均值为 97.32、7.36, 高于中国土壤平均值, 表明土壤 P 有效性较低。综上所述, 研究区白桦林在低密度(100—700 株/hm²) 时, 土壤理化性质的改良作用相对较好, 会更有利于土壤物理结构的稳定和养分积累。

关键词: 白桦天然林; 林分密度; 土壤理化性质; 土壤生态化学计量

Characteristics of soil physical and chemical properties of natural *Betula platyphylla* forests with different stand densities in the eastern Qilian Mountains

PENG Xiaojing^{1,2,3}, HUANG Haishan⁴, YAN Zhiyin⁴, ZOU Xingchen^{1,2,3}, HE Kangning^{1,2,3,*}, CHENG Chang^{1,2,3},
WANG Zuoxiao^{1,2,3}, LI Rui^{1,2,3}, LIU Jingwen^{1,2,3}, SHI Zhengyang^{1,2,3}, LIU Qianqian^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation State Forestry Administration, Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

3 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Baoku Forest Farm, Datong Hui Tu Autonomous County, Xining 810100, China

基金项目: 青海省应用基础研究项目(2020-ZJ-713)

收稿日期: 2024-04-30; 网络出版日期: 2024-10-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

Abstract: In order to study the effects of different plantation densities on the soil physicochemical properties of *Betula platyphylla* natural forests, this study analysed the patterns of changes in soil physicochemical properties under varying stand densities, and provided reasonable density references for the protection of *Betula platyphylla* natural forests. The *Betula platyphylla* natural secondary forests in Baoku Forest Area, Datong County, Xining City, Qinghai Province were used as the research object, soil surface and deep layer samples were collected to investigate and determine the soil bulk density, soil water content, field capacity, total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity, saturated hydraulic conductivity (K_{st}), soil pH value, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), alkali-hydrolyzed nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK) content, and a total of 17 soil property indicators including C:N, C:P, N:P. Soil attributes were investigated for six different stand densities of 100—400, 400—700, 700—1000, 1000—1500, 1500—2100, 2100—2500 plant $\cdot$ hm $^{-2}$. The data were tested for significance and correlation analyzed using SPSS22.0. The Least Significant Difference (LSD) method and Duncan's Analysis (Duncan) in One-way ANOVA were applied to test the differences in soil physical and chemical properties across different densities and soil layers. The results showed that: (1) In terms of vertical distribution characteristics, soil porosity, K_{st} , the contents of soil SOC, TN, TP, AN, AK and the ratios of C:P and N:P showed a decreasing trend with the increase of soil depth. Conversely, soil bulk density and soil pH value increased with the increase of soil depth. (2) In terms of density distribution characteristics, the contents of soil SOC, TN and AN, as well as the ratios of C:P and N:P, showed a slow decreasing trend as density increased, and TP content shows no significant change with increasing density, all of the these indicators reached its maximum values when the density was 100—400 plant/hm 2 . The soil water content, field capacity, K_{st} , and porosity first increased and then decreased with increasing density, and these indicators reached their maximum at a density of 400—700 plant/hm 2 , while the soil bulk density reached its minimum at this density. (3) In terms of soil stoichiometric characteristics, the average values of soil C:P and N:P in the study area are 97.32 and 7.36, which are higher than the average values of Chinese soils, indicating that soil P effectiveness was low. In summary, when the density of birch forests in the study area is low (100—700 plant/hm 2), the improvement effect of soil physical and chemical properties is relatively good, which will be more conducive to the stability of soil physical structure and nutrient accumulation.

Key Words: *Betula platyphylla* natural forests; stand density; soil physico-chemical properties; soil ecological stoichiometry

森林土壤作为森林生态系统的重要组成部分^[1],是植物赖以生存的媒介和载体^[2],影响着植物生长,为林木生长提供必要的水分和养分^[3],对林地生产力和森林生态系统物质能量循环^[4]产生着重要影响^[5],具有重要的生态功能意义^[6]。植物在生长过程中会改变土壤物理结构^[7]和养分状况^[8]。反之,土壤理化性质也会对林木生长发育产生一定影响^[6],其中土壤 C、N、P 元素和其比值可以有效反映土壤养分状况和限制性元素种类。

林分密度不仅影响林下光照、温度、湿度等环境因子,也影响着林木生长、林下物种组成^[9]、土壤质量^[10]及其养分含量^[11],同时也会影响土壤理化性质和养分循环^[12]。林分密度是仅次于立地质量的影响林分生产力的第二关键因素^[13]。密度和植被-土壤^[14]反馈有关^[15],有研究表明植物会发生密度依赖性死亡^[16],所以合理的林分密度不仅对土壤理化性质有改良作用,也会对林木生长产生积极影响。国内外诸多学者对不同林分密度下多种林型的土壤理化性质及养分特征进行了大量研究^[17],表明林分密度对土壤理化性质的影响具有普遍性和差异性^[4],差异性主要是因为地域不同和树种不同导致。通过陈萍等^[12]、范少辉等^[13]、冯燕辉等^[18]对不同林分类型的研究发现,部分土壤养分含量随密度增大大致呈先增后减的变化趋势;许松葵等^[19]研究发现大叶相思幼林土壤理化性质在低密度和中密度时改良作用更好;朱燕等^[6]研究发现刺槐林在低密度时土壤 SOC、TN、TP 含量显著高于其余密度。探究不同区域树种的林分密度对提高土壤改良作用具有重

要意义。

青海省属长江、黄河和澜沧江的发源地,有“江河源头”和“中华水塔”之称,研究区位于湟水河上游北川河流域,该流域是西宁市重要的水源涵养地和生态屏障,研究区又是该流域重要的水源涵养林自然保护区和生态环境建设区,所以宝库林区的生态地位十分重要。白桦(*Betula platyphylla*)作为青海大通主要天然次生林树种,属温带树种,在大通境内分布广泛,是一种喜光不耐荫、耐严寒耐贫瘠、生长快萌芽强且寿命较短的深根性先锋树种,出现频度仅次于青海云杉(*Picea crassifolia*),具有涵养水源、保持水土、调洪削峰、净化水质和保育土壤等生态服务功能。不同密度的白桦天然林的形成受到人为破坏、自然干扰、种子传播、土壤水分和养分、光照资源以及植物生态竞争等因素的影响。白桦林作为该地区天然演替的先锋树种,其演替过程大致如下:白桦作为先锋树种,在演替初期迅速更新,形成白桦林;随着时间的推移,白桦林郁闭遮阴,为青海云杉等耐阴树种的生长提供条件,逐渐形成针阔混交林;演替后期,青海云杉逐渐成为优势树种,白桦林会因得不到充足的光照而逐渐衰退,因为中生、阴生性植物能更好地适应当下的环境,所以会逐渐取代阳生物种的优势地位^[20],最终形成青海云杉天然林顶级群落。

目前国内研究多集中在白桦次生林土壤特性^[21]、养分变化^[22]和土壤碳通量^[23]对林龄的响应特征研究上,对不同林分密度的相关研究资料较少,且对于不同林分密度土壤理化性质的研究多集中于针叶人工林树种,对于天然阔叶林树种的研究相对较少。因此,本文以不同密度白桦天然林为研究对象,采用野外调查和室内试验结合的方法对土壤属性指标进行分析,探讨了青海祁连山东部地区白桦林地土壤理化性质对林分密度变化的响应特征,旨在为相似地区相似林地的森林经营提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于青海省西宁市大通回族土族自治县(36°43′—37°23′N,100°51′—101°56′E),位于寒温带半湿润地带,地处青海东部河湟谷地,祁连山南麓,大通县三面环山,处在祁连山地和黄土高原的过渡地带,海拔高度为2280—4622m,地势西北高东南低,全境沟壑纵横、地形复杂。属高原大陆性气候,气候寒冷干燥,垂直变化明显。全县平均气温2.8℃,昼夜温差大,一般7月份气温最高,秋季短暂,冬季漫长。降雨集中在暖季的5—9月份,年均降水量在508mm左右,全年降水天数约168d。年均空气相对湿度56%,年均蒸发量1762.8mm,年内无霜期在70—120d左右。年均日照时数长,太阳辐射强烈,最大风速为18m/s,最大冻土深度为114cm,冰冻期长,最大积雪厚度为18cm。主要土壤类型为山地棕褐土、栗钙土和黑钙土,土壤深厚^[24]。该地区主要乔木树种有青海云杉、白桦、青杨(*Populus cathayana*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)等;主要灌木树种有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、金露梅(*Dasiphora fruticosa*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、山生柳(*Salix oritrepha* Schneid)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、秦岭小檗(*Berberis circumserrata*)、西北栒子(*Cotoneaster zabelii* Schneid)和唐古特忍冬(*Lonicera tangutica*)等;主要草本植物有珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、野草莓(*Fragaria vesca*)、鹿蹄草(*Pyrola calliantha*)和黑麦草(*Lolium perenne*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

2023年6月,在青海祁连山东部北川河流域开展调查,在白桦天然林林龄为32—65a,选择成土母质基本一致,坡向、坡度、海拔等立地条件相似的样地,划分6个密度梯度(林分密度Ⅰ:100—400株/hm²、林分密度Ⅱ:400—700株/hm²、林分密度Ⅲ:700—1000株/hm²、林分密度Ⅳ:1000—1500株/hm²、林分密度Ⅴ:1500—2100株/hm²、林分密度Ⅵ:2100—2500株/hm²),每个密度梯度设置4块样地(共设24块样地),样地规格均为20m×20m,为消除边缘效应设置了4m的缓冲区^[25]。样地基本信息见表1。

2.2 土壤理化性质指标采集与测定

利用GPS记录各样地的经纬度、海拔(m)、坡度(°)、坡向等立地指标,对样地内的白桦进行每木检尺调

查,测量其树高(m)、胸径(cm)、冠幅(cm)、坐标(x,y)等因子。由于林地土壤理化特性在60cm以下差异不大^[26],所以本研究在每块样地挖取一个典型土壤剖面并按0—20、20—40、40—60cm三层进行分层取样,土壤采集分成两部分,一部分是利用环刀采集各土层原状土,使用烘干法和浸泡法测定土壤容重^[27]、质量含水量和孔隙度指标,使用恒定水头法测定土壤饱和导水率^[28];另一部分是在样地选取5个合适样方使用土钻从地面向下分3层进行取样,同层土壤均匀混合为1个土样并做好标记,然后装于塑封袋中带回实验室用于化学性质的测定。将混合土样中的枝叶、石块剔除后在阴凉处进行风干,再经过磨细、过筛后以便测定土壤pH值(酸度计法,水土比2.5:1)^[27]、土壤有机碳(重铬酸钾-外加热法)^[29]、全氮(凯氏定氮法)、全磷(硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法)、速效磷(氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色法)、速效钾(醋酸铵-火焰光度计法)^[12]、碱解氮(靛酚蓝比色法)含量^[25]。

表1 样地基本信息表

Table 1 Basic information table of sample land

样地编号 Plot numbers	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	林龄 Stand age/a	郁闭度 Canopy density
I ₁	174	2818	阴坡	33	31.03±6.28	20.97±2.19	58±3	0.56
I ₂	278	2956	半阳坡	28	28.80±7.46	18.19±2.69	56±4	0.45
I ₃	348	2779	阴坡	21	26.72±6.36	15.37±2.25	55±4	0.57
I ₄	382	2881	阴坡	23	29.50±12.68	14.88±2.90	56±9	0.62
II ₁	400	2894	阴坡	24	32.33±9.86	16.91±0.72	58±5	0.55
II ₂	452	2788	阴坡	25	21.94±14.48	15.12±4.26	49±11	0.58
II ₃	573	2831	阴坡	21	22.93±4.86	15.12±4.12	53±4	0.56
II ₄	678	2794	阴坡	21	17.48±12.56	14.33±4.56	46±10	0.55
III ₁	764	2773	阴坡	22	21.11±2.07	13.48±1.94	52±1	0.53
III ₂	869	2796	半阴坡	19	20.10±3.76	16.37±0.90	51±3	0.55
III ₃	921	2803	阴坡	27	16.82±9.15	14.01±4.43	47±8	0.59
III ₄	955	2837	阴坡	28	20.69±9.81	15.54±4.37	50±8	0.41
IV ₁	1025	2822	阴坡	26	19.86±4.81	17.44±1.45	51±4	0.68
IV ₂	1025	2880	半阴坡	24	20.13±4.48	17.62±1.50	51±4	0.55
IV ₃	1094	2849	阴坡	25	20.26±2.94	16.74±2.06	52±2	0.67
IV ₄	1181	2904	半阴坡	23	18.22±5.54	16.52±1.98	49±5	0.57
V ₁	1598	3003	阴坡	41	16.86±7.94	14.68±4.60	47±7	0.61
V ₂	1800	2936	阴坡	18	14.46±11.41	6.54±1.13	44±10	0.69
V ₃	1922	3044	阴坡	35	16.92±6.91	15.92±3.36	48±7	0.64
V ₄	2016	2868	阴坡	24	10.54±7.24	11.16±3.72	40±7	0.59
VI ₁	2160	2940	半阳坡	17	9.34±6.87	6.35±1.39	39±7	0.69
VI ₂	2200	2965	阴坡	35	9.83±3.65	13.18±3.57	40±5	0.72
VI ₃	2379	2793	阴坡	24	9.53±3.36	8.41±2.67	40±5	0.74
VI ₄	2469	2946	半阳坡	14	8.32±2.87	6.04±0.82	38±4	0.64

I:林分密度I(100—400株/hm²);II:林分密度II(400—700株/hm²);III:林分密度III(700—1000株/hm²);IV:林分密度IV(1000—1500株/hm²);V:林分密度V(1500—2100株/hm²);VI:林分密度VI(2100—2500株/hm²);DBH:胸径Diameter at breast height,表中数据为平均值±标准误

2.3 数据处理与分析

用Excel对外业调查和室内试验获得的数据进行整理;采用SPSS 22.0对数据进行统计分析,运用单因素分析(One-way ANOVA)中的最小显著性差异法(LSD)和邓肯检验(Duncan)对不同密度、不同土层土壤理化性质进行显著性差异分析和事后检验;运用Pearson相关关系分析土壤理化性质间的相关性;化学计量比用质量比表示。相关绘图由Origin 2021软件完成。

3 结果与分析

3.1 土壤物理性质特征

土壤容重可以反映土壤紧实程度^[30],研究区白桦天然林的容重随土层深度增加而增加(表2),说明土壤表层较为疏松,中下层致密,其平均值变化范围为0.40—1.47g/cm³,平均值为0.93g/cm³,表明白桦林对土壤有较好的疏松和改良效果。在土壤表层0—20cm中容重随密度增加呈先减后增的变化规律,且密度Ⅱ时的容重显著低于密度Ⅲ、Ⅴ、Ⅵ($P<0.05$);中下层容重随密度增加无显著差异变化($P>0.05$)。研究区土壤质量含水量的数据测定均来源于6月份,质量含水量随土层深度增加呈先增后减的变化趋势,通常在中层达到最高(表2),随密度增加呈先增后减的变化趋势,各土层质量含水量均在密度Ⅱ时达到峰值,并且在中层20—40cm和下层40—60cm中密度Ⅱ时的质量含水量显著高于密度Ⅵ。土壤田间持水量是衡量土壤持水能力的一个重要指标^[31],相关数据测定均来源于6月份,其随土层深度增加呈现与质量含水量相同的变化趋势。在20—40cm土层,密度为Ⅱ时的持水量显著高于密度Ⅴ和Ⅵ(表2),随密度增加田间持水量呈先增后降的变化趋势,且各土层均在密度Ⅱ时达到最大。土壤饱和导水率(K_{st})指土壤在水饱和状态下,在单位水势梯度、单位时间内流过单位面积的水量^[32],是反映土壤渗透能力^[33]和水分入渗特征的重要指标^[34]。研究区林地 K_{st} 的变化范围为0.04—3.35mm/min,平均值为0.745mm/min,表层 K_{st} 明显高于中下层(表2),在土壤各土层中,密度为Ⅱ时的 K_{st} 均显著高于密度Ⅴ,且都在该密度时 K_{st} 达到最大值,表明该密度下土壤导水能力较好。

表2 不同林分密度下土壤容重和持水特征

Table 2 Characteristics of soil bulk density and water holding capacity under different stand densities

林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	土层深度 Soil depth/cm	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	土壤质量含水量 Soil water content/%	田间持水量 Field capacity/%	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (mm/min)
100—400	0—20	0.78±0.09ABa	0.25±0.08Aa	0.24±0.08Aa	1.69±0.53ABa
	20—40	0.92±0.12Aa	0.32±0.08ABa	0.31±0.08ABa	1.00±0.75Aab
	40—60	1.04±0.29Aa	0.30±0.06ABa	0.29±0.07Aa	0.54±0.31ABb
400—700	0—20	0.59±0.16Bb	0.28±0.08Aa	0.27±0.08Aa	1.97±0.97Aa
	20—40	0.78±0.11Aab	0.44±0.14Aa	0.43±0.13Aa	1.00±0.60Aa
	40—60	0.98±0.25Aa	0.34±0.08Aa	0.33±0.08Aa	0.77±0.53Aa
700—1000	0—20	0.84±0.30Aa	0.24±0.08Aa	0.23±0.07Aa	0.73±0.45BCa
	20—40	0.91±0.29Aa	0.34±0.10ABa	0.34±0.10ABa	0.33±0.20ABa
	40—60	1.15±0.26Aa	0.31±0.09ABa	0.30±0.08Aa	0.25±0.20Ba
1000—1500	0—20	0.76±0.08ABb	0.21±0.05Ac	0.20±0.05Ac	1.58±0.63ABa
	20—40	0.96±0.09Ab	0.33±0.03ABa	0.32±0.03ABa	0.75±0.14ABb
	40—60	1.19±0.21Aa	0.27±0.02ABb	0.26±0.02Ab	0.56±0.24ABb
1500—2100	0—20	0.90±0.09Aa	0.22±0.04Aa	0.22±0.03Aa	0.43±0.25Ca
	20—40	0.92±0.09Aa	0.28±0.05Ba	0.27±0.04Ba	0.25±0.12Ba
	40—60	1.06±0.14Aa	0.25±0.03ABa	0.25±0.03Aa	0.18±0.09Ba
2100—2500	0—20	0.90±0.10Ab	0.23±0.02Ab	0.22±0.02Ab	0.78±0.58BCa
	20—40	0.98±0.11Aab	0.28±0.03Ba	0.28±0.03Ba	0.35±0.29ABa
	40—60	1.08±0.11Aa	0.25±0.01Bb	0.24±0.01Aab	0.27±0.27Ba

同列不同大写字母表示不同林分密度相同土层之间差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示相同林分密度不同土层之间差异显著($P<0.05$)

土壤孔隙度可以反映土壤疏松程度和通气、透水性能^[35],土壤孔隙由毛管孔隙和非毛管孔隙构成,毛管孔隙是土壤孔隙的主要构成部分,由于不同密度林下植被和枯落物不同,所以孔隙状况也存在差异,研究区白桦林土壤毛管孔隙度和总孔隙度随密度增加大致呈先增后降的变化趋势,在垂直剖面上,孔隙度随土层深度增加而减小(表3)。在各密度中土壤平均总孔隙度和毛管孔隙度的排序为:密度Ⅱ>Ⅲ>Ⅳ>Ⅰ>Ⅵ>Ⅴ,并在密度Ⅱ时平均总孔隙度达到最大为60.84%,说明在该密度下土壤有较好的改善孔隙状况的能力,在0—60cm

土层中土壤平均总孔隙度为 53.61%, 变化范围为 44.08%—68.94%。在密度 II 时平均毛管孔隙度达到最大为 57.6%。在 0—60cm 土层中平均毛管孔隙度为 51.06%, 变化范围为 42.04%—65.36%。在各密度中土壤平均非毛管孔隙度的排序为: 密度 II > III > I > V > VI > IV, 0—60cm 土层平均非毛管孔隙度为 2.55%, 变化范围为 1.66%—3.29%。差异检验结果显示, 不同密度间的土壤平均孔隙度差异均不显著 ($P>0.05$), 但均在密度为 II 时三者的值达到最大。

表 3 不同密度下各层土壤孔隙状况

Table 3 Soil porosity conditions in different layers under different stand densities

林分密度 Stand density/(株/hm ²)	土层深度 Soil depth/cm	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%
100—400	0—20	54.63±13.19Aa	3.16±1.49Aa	57.79±11.72Aa
	20—40	49.36±12.78Aa	2.61±1.04Aa	51.97±11.78Aa
	40—60	45.84±12.43Aa	1.66±0.48Ba	47.50±12.59Aa
	平均值	49.94±12.18Aa	2.47±1.17Aa	52.42±11.74Aa
400—700	0—20	65.36±14.90Aa	3.59±0.92Aa	68.94±15.27Aa
	20—40	57.3±9.55Aa	3.29±0.78Aa	60.59±10.18Aa
	40—60	50.14±9.64Aa	2.84±0.70Aa	52.98±10.20Aa
	平均值	57.6±12.36Aa	3.24±0.79Aa	60.84±12.90Aa
700—1000	0—20	59.31±9.77Aa	3.00±1.31Aa	62.3±10.49Aa
	20—40	55.03±7.27Aa	2.45±0.91Aa	57.48±7.84Aa
	40—60	46.39±9.95Aa	2.25±0.88ABa	48.64±10.69Aa
	平均值	53.58±9.95Aa	2.57±1.00Aa	56.14±10.63Aa
1000—1500	0—20	55.81±4.15Aa	2.59±1.62Aa	58.4±5.76Aa
	20—40	50.11±2.17Aab	2.25±1.42Aa	52.36±3.22Aab
	40—60	45.58±5.33Ab	1.92±1.40ABa	47.5±4.18Ab
	平均值	50.50±5.73Aab	2.25±1.37Aa	52.75±6.18Aab
1500—2100	0—20	51.54±7.49Aa	2.96±0.63Aa	54.50±8.02Aa
	20—40	46.58±6.48Aa	2.38±0.48Aa	48.96±6.93Aa
	40—60	42.04±5.94Aa	2.04±0.53ABa	44.08±6.36Aa
	平均值	46.72±7.27Aa	2.46±0.64Aa	49.18±7.84Aa
2100—2500	0—20	52.00±4.14Aa	2.88±0.25Aa	54.88±4.11Aa
	20—40	48.00±2.27Aab	2.38±0.48Aa	50.38±2.53Aab
	40—60	44.00±1.96Ab	1.70±0.41ABb	45.7±1.71Ab
	平均值	48.00±4.33Aab	2.32±0.61Aab	50.32±4.74Aab

3.2 土壤化学性质特征

3.2.1 土壤酸碱度和养分特征对林分密度的响应

对不同土层不同密度的白桦林土壤 pH 和养分特征进行分析得出如下结论(图 1)。研究区土壤 pH 的平均值为 6.7, 以酸性土居多, 在不同密度的同一土层 pH 值均无显著变化差异, 通常情况下同一研究区的 pH 值是相对稳定的。在 0—60cm 土层中不同密度 SOC 平均含量为 59.06g/kg, 各密度 SOC 平均含量均在表层达到最高, 分别为: 93.10g/kg、72.20g/kg、69.65g/kg、69.10g/kg、65.44g/kg、62.11g/kg, 在密度为 IV 时, 表层和下层 SOC 含量存在显著差异 ($P<0.05$); 在密度为 V 时, 表层 SOC 含量显著大于中下层。表层 SOC 含量在各密度中差异均不显著 ($P>0.05$); 在土壤中下层, 密度为 I 时的 SOC 含量均显著高于密度 V。土壤全量养分主要指全氮和全磷, 其含量主要受成土母质和植被养分循环的影响^[36]。0—60cm 土层中平均 TN 含量为 4.49g/kg, 变化范围为 2.80—6.89g/kg, 不同密度 TN 平均含量排序为: 密度 I > II > IV > III > V > VI。在密度为 III、IV 时, 表层土壤 TN 含量显著高于下层; 在密度为 V、VI 时, 表层 TN 含量显著高于其余两土层。在土壤中下层, 密度为 I 时的平均 TN 含量显著高于密度 V。0—60cm 土层中平均 TP 含量为 0.61g/kg, 变化范围为 0.54—0.71g/kg, 不同密度 TP 平均含量排序为: 密度 I > V > VI > IV > III > II, 6 种密度在不同土层中 TP 含量无显著变化差异, 在中下层土壤中 TP 含量均在密度 I 时达到最大。

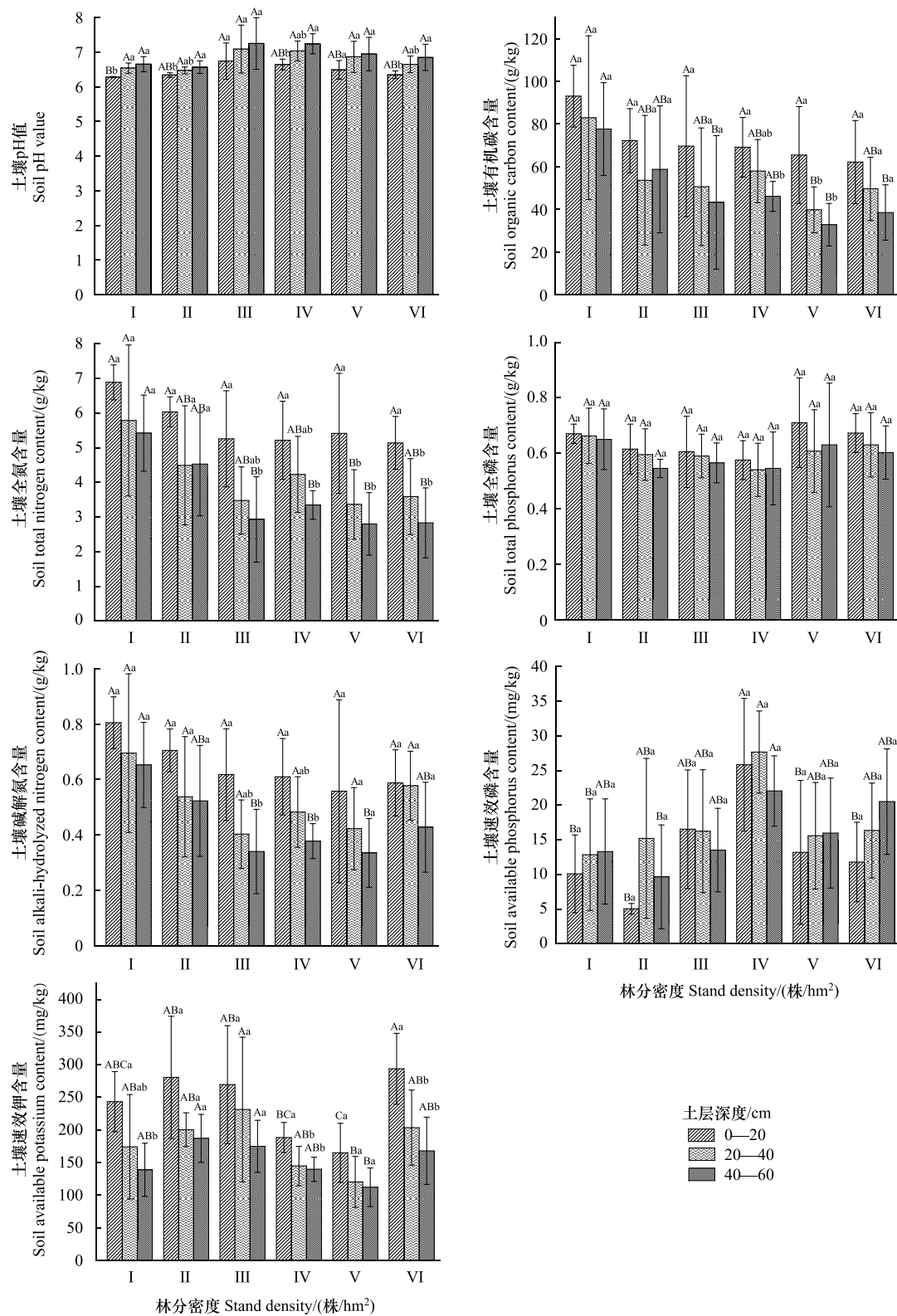


图1 不同林分密度下的土壤 pH 值和养分特征

Fig.1 Soil pH values and soil nutrients characteristics in different stand densities

I: 林分密度 I (100—400 株/hm²); II: 林分密度 II (400—700 株/hm²); III: 林分密度 III (700—1000 株/hm²); IV: 林分密度 IV (1000—1500 株/hm²); V: 林分密度 V (1500—2100 株/hm²); VI: 林分密度 VI (2100—2500 株/hm²); 不同大写字母表示不同林分密度相同土层之间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示相同林分密度不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$)

在 0—60cm 土层中,土壤平均 AN 含量为 0.54g/kg,变化范围为 0.34—0.81g/kg,在土壤表层和中层,AN 含量在各密度间差异均不显著,但都在密度 I 时达到最大;在土壤下层,密度为 I 时的 AN 含量显著高于密度 III、IV、V。在密度为 III、IV 时,表层 AN 含量显著高于下层;AN 含量最高值出现在密度为 I 时的表层土壤中,为 0.81g/kg。在 0—60cm 土层中 AP 平均含量为 15.63mg/kg,变化范围为 5.04—27.66mg/kg,随密度增加 AP 含量大致呈先增后减的变化趋势,三个土层中 AP 含量均在密度 IV 时达到最大,分别为 25.83mg/kg、27.66mg/kg、22.05mg/kg,说明该密度有利于 AP 积累。在土壤各土层,密度为 IV 时的 AP 含量均达到最大。在 0—60cm 土层中土壤平均 AK 含量为 190.78mg/kg,变化范围为 112.02—293.77mg/kg,总体来看,随密度变化 AK 含量呈不规则变化,在土壤各土层中,密度为 V 时的 AK 含量均低于其它密度。当密度为 I 时,表层 AK 含量显著高于下层;当密度为 IV、VI 时,表层 AK 含量显著高于中下层,AK 含量最大值出现在密度 VI 的表层土壤中,为 293.77mg/kg。

3.2.2 土壤化学计量比变化特征

由图 2 可知,白桦天然林在 0—60cm 土层中土壤 C:N 平均值为 13.02,变化范围为 11.27—14.16,排序为:密度 I > IV > III > VI > V > II, C:N 随林分密度和土层深度增加均无显著变化规律 ($P>0.05$)。0—60cm 土层中土壤 C:P 平均值为 97.32,变化范围为 54.28—138.55,排序为:密度 I > IV > II > III > VI > V,当密度为 V 时,表层土壤 C:P 显著高于下层。在 0—60cm 土层中土壤 N:P 平均值为 7.36,变化范围为 4.54—10.29,排序为:密度 I > II > IV > III > VI > V,当密度为 III、V、VI 时,表层土壤 N:P 显著高于其它土层。在土壤表层和中层,各林分密度间 C:P 和 N:P 没有显著变化差异,但都在密度 I 时达到最大;在土壤下层,密度为 I 时的 C:P 和 N:P 显著高于密度 V。

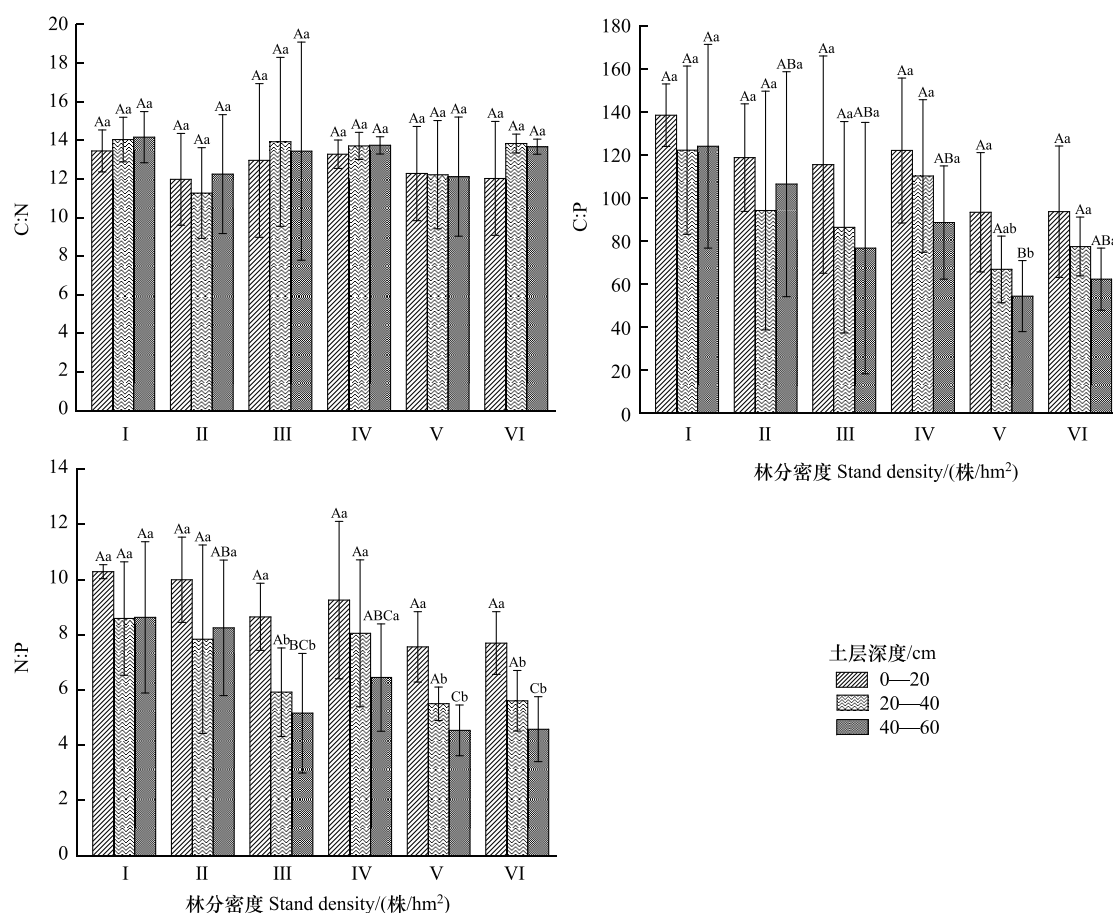


图 2 林地土壤化学计量比特征

Fig.2 Soil stoichiometric characteristics of plantations

3.3 土壤理化性质相关性分析

对白桦天然林的土壤理化性质进行相关性分析得出:土壤容重与孔隙度、 K_{st} 、SOC、TN、AN 含量、N:P 之间呈极显著负相关($P<0.01$);与田间持水量、质量含水量、AK 含量、C:P 呈显著负相关($P<0.05$)。田间持水量与质量含水量、毛管、总孔隙度之间呈极显著正相关。土壤孔隙度与质量含水量、 K_{st} 和大部分养分含量指标间的正相关性较强。 K_{st} 与 SOC、TN、AN 含量、C:P、N:P 呈极显著正相关。土壤 pH 值除了与容重和 AP 含量呈极显著正相关外,与其余多数指标都呈现不同程度的负相关关系。土壤 SOC、TN、AN 与 TP、AK 含量和化学计量比之间的正相关性较强。AP 与多数养分含量之间都存在着不同程度的负相关关系。AK 与 K_{st} 、TP 含量、C:P、N:P 之间的正相关性较强。各土壤化学元素计量比之间的正相关性较强(表 4)。

4 讨论

4.1 不同密度对土壤物理性质特征的影响

林分密度发生变化必然导致林地生境发生变化^[37],同时也会使林地土壤理化性质发生变化^[38],土壤物理性质是反映土壤结构的重要指标^[39],不同土层间理化性质的差异反映了各因子在垂直剖面上的变异程度^[40]。研究发现,随着土层深度增加,土壤容重变大^[41],孔隙度和 K_{st} 减小。随着林分密度增大,土壤容重呈先减后增的变化趋势^[4];土壤质量含水量^[4]、孔隙度和 K_{st} 则呈先增后减的变化趋势。各密度的土壤质量含水量均以中层偏高^[6],表层偏低,可能是因为表层土壤直接受阳光照射使得温度高且蒸腾大。当白桦林地的 K_{st} 大于 0.694mm/min 时,说明土壤水分渗透性高,可有效减少地表径流,增加土壤持水量^[28],研究区导水率变化范围为 0.04—3.35mm/min,平均值为 0.745mm/min, K_{st} 偏向中高值,说明研究区土壤导水能力较好。在林分密度为 II 时,除土壤容重达到最小值外^[4],其余物理属性指标均达到最大。因为容重越小,土壤越疏松,总孔隙度就越大,进而增加土壤质量含水量、提高土壤持水能力,也可能因为落叶阔叶树种枯落物现存量多且腐化速率快^[28],使得有机质含量增加,进而降低土壤容重,改善土质,提高田间持水量;相反容重增大会使土壤孔隙度变小,根系很难在土壤中穿插,因而不利于土壤水分、养分对植物的输送。在林分密度过低时,林木根系分布少使得孔隙分布少,导致土壤蓄水能力较差;在密度过高时林木间的竞争压力又会变大,不利于土壤发育和植物生长,所以密度过大或过小都不利于改良土壤结构。一般来说土壤中同时存在大小孔隙,通常认为当总孔隙度为 50%左右,非毛管孔隙占总孔隙约 20%—40%时,土壤通透性能相对较好^[42]。本研究土壤总孔隙度在 50%—60%左右,但非毛管孔隙度偏小(1.66%—3.29%),可能是因为孔隙状况不仅受林分密度影响,也会受林分空间结构、林下枯落物层、土壤动物和微生物活动的影响^[43]。综上可得研究区白桦林在密度为 II 时能更好地提高土壤蓄水保水能力以及改良土壤结构。

4.2 不同密度对土壤酸碱度和养分特征的影响

同类型森林会因林分密度不同使得土壤养分含量分布不同^[17],因为密度不仅可以决定林木个体获得养分的水平,也会通过冠层对光照和水分的影 响来控制林内通风透光状况,进而影响养分含量分布^[44]。研究区土壤表层 pH 值低于其它土层,可能是因为表层枯枝落物多使得酸性物质分解较多,从而降低了 pH 值^[45]。SOC^[46]、TN^[47]、TP、AN、AK^[48] 含量均随土层深度增加而降低,与多数地区多数林型的研究结果相似^[49],说明土壤养分具有明显的“表聚现象”^[50],因为表层覆盖有大量枯落物,其分解过程对养分积累作用很大,这也是土壤表层养分富集的主要原因。但 AP 含量随土层变化没有表现出此规律,可能是因为磷本身的迁移能力较差。土壤 C、N 含量主要由有机质中的 N 输入量和输出量所决定^[51],随着密度增大,TN、AN^[52] 含量呈现与 SOC 含量相同的变化趋势;TP 含量随密度变化差异不显著,可能是因为土壤磷素来源于岩石风化淋溶,属沉积性元素,受土壤母质影响较大^[6],在土壤中分布均匀且不易受环境影响。土壤 SOC、TN、TP、AN 含量均在密度 I 时最大^[52]。可能是因为 在低密度时白桦阔叶林可以充分吸收光照,对环境的资源利用率高,且林木间的竞争不大,但随着密度增大,郁闭度也随之增大,喜光树种白桦获得的光照资源逐渐减少^[20]、对光照竞争增强、种间竞争激烈、枯落物分解速率变慢,进而导致土壤养分归还量减少,林木对养分的消耗得不到及时补充,

表 4 土壤理化性质相关性分析
Table 4 Correlation analysis of soil physical and chemical properties

指标 Index	土壤容重 Soil bulk density	田间持水量 Field capacity	土壤质量含水量 Soil water content	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	总孔隙度 Total porosity	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	pH	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	C:N	C:P
田间持水量	-0.261 *															
土壤质量含水量	-0.261 *	0.998 **														
毛管孔隙度	-0.772 **	0.367 **	0.367 **													
非毛管孔隙度	-0.411 **	0.138	0.174	0.339 **												
总孔隙度	-0.783 **	0.367 **	0.371 **	0.996 **	0.426 **											
饱和导水率	-0.556 **	-0.073	-0.067	0.461 **	0.314 **	0.474 **										
PH	0.448 **	0.005	-0.005	-0.282 *	-0.320 **	-0.303 **	-0.373 **									
有机碳	-0.328 **	-0.018	-0.003	0.205	0.379 **	0.235 *	0.470 **	-0.570 **								
全氮	-0.374 **	-0.098	-0.084	0.233 *	0.418 **	0.266 *	0.527 **	-0.687 **	0.899 **							
全磷	-0.167	-0.148	-0.155	-0.091	-0.05	-0.093	0.077	-0.472 **	0.281 *	0.427 **						
碱解氮	-0.321 **	-0.100	-0.088	0.162	0.368 **	0.193	0.460 **	-0.665 **	0.818 **	0.920 **	0.462 **					
速效磷	0.133	-0.073	-0.080	-0.009	-0.078	-0.017	-0.209	0.468 **	-0.288 *	-0.375 **	-0.343 **	-0.369 **				
速效钾	-0.259 *	-0.130	-0.125	0.137	0.227	0.155	0.282 *	-0.383 **	0.306 **	0.430 **	0.233 *	0.392 **	-0.255 *			
C:N	-0.096	0.171	0.177	0.064	0.046	0.066	0.042	-0.027	0.553 **	0.163	-0.149	0.138	0.049	-0.110		
C:P	-0.286 *	0.055	0.075	0.254 *	0.408 **	0.285 *	0.432 **	-0.415 **	0.910 **	0.762 **	-0.107	0.659 **	-0.133	0.235 *	0.620 **	
N:P	-0.337 **	-0.018	0.002	0.307 **	0.477 **	0.343 **	0.515 **	-0.509 **	0.821 **	0.862 **	-0.057	0.748 **	-0.188	0.353 **	0.248 *	0.90 **

* 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)

使得白桦生长空间受限,所以养分含量随密度增加而降低^[12]。有学者对大叶相思^[19]、刺槐^[6]、油松^[53]和杉木^[54]进行研究发现土壤养分含量随密度增加而降低,与本研究多数养分含量变化趋势相一致,表明较低的林分密度更有利于土壤肥力和水分的补充^[55]。

4.3 土壤化学计量比特征

C 是植物生产过程中的结构性元素^[56],N 和 P 是植物生长必要的营养元素,也是常见的限制性元素^[57]。土壤 C、N、P 化学计量比可指示植物对养分的利用和限制状况,也可以反映森林土壤元素的相对含量^[58]。研究区土壤 C:N、C:P、N:P 平均值分别为 13.02、97.32、7.36,三者随密度增加均无显著变化规律。C:N、C:P 可指示土壤 N 和 P 的有效性和矿化能力,C:P 也可表示 P 的有效性,N:P 可指示 N、P 含量的相对平衡状态。较低的 C:P 有利于微生物分解释放养分,指示 P 有效性高;较高的 C:P 不利于微生物对有机质的分解^[59],指示 P 有效性低。研究区 C:N、C:P 平均值大于全国土壤平均值(10—12、61)^[60],表明研究区有机质矿化作用较慢,微生物在分解有机质过程中受到 P 限制,但有利于有机质积累^[6],正好验证了本研究区土壤有机质含量较大的结果,较高的 C:N、C:P 是高原植物的生长特点,使植物可以增强对外界不利环境的抵御能力^[61]。N:P 较高表示 N 活性较高,植物受 P 限制;N:P 较低表明 P 活性较高,植物受 N 限制^[62]。研究区 N:P 平均值高于中国土壤平均水平^[60],说明白桦林地土壤 N 活性较高,植物可能受 P 限制^[29],研究区 TP 平均含量为 0.61g/kg,低于全国平均值(0.78g/kg),表明植物受 P 限制^[63],可能是因为研究区处于高寒环境中,低温对微生物活性产生了抑制作用^[64]。因此在该研究区白桦天然林地经营中可适当补充磷肥^[63]。

4.4 土壤理化性质之间的相关性

本研究相关性分析表明,土壤容重与田间持水量、 K_{st} 呈现不同程度的负相关,因为随着容重变大土壤变紧实且孔隙减少使得土壤内部连通性变差,水分流动受到阻碍,水流量减少,从而降低了田间持水量和 K_{st} ^[65]。容重、pH 值与孔隙度、SOC、TN 含量之间呈负相关,可能与森林土壤发育有关^[6],因为表层凋落物分解使得 C、N 元素大量积累,土壤变疏松,从而降低了土壤容重,提高了土壤通透性^[66],且较高的土壤容重和 pH 值不利于土壤通气以及根系的生长,同时也会限制微生物活动和养分汇聚^[67]。在土壤养分指标中,SOC 与 TN、AN 的相关系数较高,因为 TN 主要由植物残体分解形成的有机质构成^[45],所以三者紧密相关。

5 结论

(1)在垂直分布特征方面:在密度相同的条件下,表层的土壤容重和 pH 值均小于中下层土壤,土壤孔隙度、饱和导水率,SOC、TN、TP、AN、AK 含量随土层深度增加而减小,其中养分含量指标呈现明显的“表聚现象”。

(2)在密度分布特征方面:随着林分密度增加,土壤 pH 值变化相对稳定;SOC、TN、AN 含量和 C:P、N:P 呈降低趋势,白桦林在密度为 I (100—400 株/hm²)时有利于土壤养分的积累。土壤质量含水量、田间持水量、饱和导水率和土壤孔隙度均随密度增加呈先增后减的变化趋势,并都在密度 II (400—700 株/hm²)时达到最大,容重在该密度时达到最小,说明白桦林在密度 II 时有助于改良土壤结构,提高土壤蓄水保水能力。

(3)土壤化学计量比的指示作用:C:P、N:P 平均值高于中国土壤平均水平,说明白桦林地土壤中 P 的有效性较低,N 有效性高,可适当补充磷肥。

(4)综上所述,当白桦天然林在低密度(100—700 株/hm²)时,不仅有利于土壤结构的改良,也有利于土壤养分的积累。但由于现阶段研究水平和各方面限制,本文未能进行更深刻的分析,未来还需进行更加全面的调查来对该区域不同密度白桦天然林的土壤理化性质特征进行探讨,为其相关研究提供参考。

参考文献(References):

- [1] Worrell R, Hampson A. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils—a review. *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 1997, 70(1): 61-85.

- [2] 胡亚伟, 施政乐, 刘畅, 徐勤涛, 张建军. 晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响. 生态学杂志, 2023, 42(9): 2072-2080.
- [3] Lagomarsino A, De Meo I, Agnelli A E, Paletto A, Mazza G, Bianchetto E, Pastorelli R. Decomposition of black pine (*Pinus nigra* J. F. Arnold) deadwood and its impact on forest soil components. The Science of the Total Environment, 2021, 754: 142039.
- [4] 董威, 刘泰瑞, 覃志杰, 郭晋平, 张芸香. 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. 生态环境学报, 2019, 28(1): 65-72.
- [5] Guendehou G H S, Liski J, Tuomi M, Moudachirou M, Sinsin B, Mäkipää R. Test of validity of a dynamic soil carbon model using data from leaf litter decomposition in a West African tropical forest. Geoscientific Model Development Discussions, 2013, 6(2): 3003-3032.
- [6] 朱燕, 翟博超, 孙美美, 罗伶书, 王瑛, 杜盛. 黄土丘陵区不同密度刺槐和油松人工林土壤理化性质与化学计量特征. 水土保持研究, 2023, 30(6): 160-167.
- [7] Güner Ş T, Erkan N, Karataş R. Effects of afforestation with different species on carbon pools and soil and forest floor properties. CATENA, 2021, 196: 104871.
- [8] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 余飞燕, 董洪君, 王敏, 郝建锋. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系. 生态学报, 2021, 41(3): 1168-1177.
- [9] Russell E S, Liu H P, Thistle H, Strom B, Greer M, Lamb B. Effects of thinning a forest stand on sub-canopy turbulence. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248: 295-305.
- [10] Ahmad B, Wang Y H, Hao J, Liu Y H, Bohnett E, Zhang K B. Optimizing stand structure for trade-offs between overstory timber production and understory plant diversity: a case-study of a larch plantation in Northwest China. Land Degradation & Development, 2018, 29(9): 2998-3008.
- [11] 李雪, 王静, 张静, 张菲, 张志东. 林龄和林分密度对华北落叶松人工林土壤养分和细菌群落的影响. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(10): 83-92.
- [12] 陈萍, 夏江宝, 王善龙, 李栋, 高芳磊, 赵万里, 马金昭. 黄河三角洲滨海滩涂不同密度柽柳林的土壤盐碱与养分特征. 生态学报, 2022, 42(24): 10180-10190.
- [13] 范少辉, 赵建诚, 苏文会, 余林, 严彦. 不同密度毛竹林土壤质量综合评价. 林业科学, 2015, 51(10): 1-9.
- [14] Wang G L, Liu G B, Xu M X. Above-and belowground dynamics of plant community succession following abandonment of farmland on the Loess Plateau, China. Plant and Soil, 2009, 316(1): 227-239.
- [15] Comita L S, Queenborough S A, Murphy S J, Eck J L, Xu K Y, Krishnadas M, Beckman N, Zhu Y, Gómez-Aparicio L. Testing predictions of the Janzen-Connell hypothesis: a meta-analysis of experimental evidence for distance-and density-dependent seed and seedling survival. The Journal of Ecology, 2014, 102(4): 845-856.
- [16] Carson W, Anderson J, Leigh E, Schnitzer S. Challenges associated with testing and falsifying the janzen-connell hypothesis: a review and critique. Trop Forest Community Ecology, 2008: 210-241.
- [17] 贺志龙, 张芸香, 郭跃东, 杨三红, 任达, 丁继伟, 郭晋平. 不同密度华北落叶松林天然林土壤养分特征研究. 生态环境学报, 2017, 26(1): 43-48.
- [18] 冯燕辉, 梁文俊, 魏曦, 赵伟文, 卜瑞英, 王凯娜. 不同林分密度华北落叶松林枯落物及土壤特征分析. 西南师范大学学报, 2021, 46(3): 179-187.
- [19] 许松葵, 王相娥, 谢腾芳, 曾锋, 黄丽铭. 不同密度大叶相思幼林的土壤肥力. 华南农业大学学报, 2008, 29(2): 79-81.
- [20] van der Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, Bezemer T M, Casper B B, Fukami T, Kardol P, Klironomos J N, Kulmatiski A, Schweitzer J A, Suding K N, Van de Voorde T F J, Wardle D A. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. Journal of Ecology, 2013, 101(2): 265-276.
- [21] 李文影, 满秀玲, 张阳武. 不同林龄白桦次生林土壤特性及其水源涵养功能. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 63-69.
- [22] 侯玲玲, 孙涛, 毛子军, 吕海亮, 赵娟, 宋元. 小兴安岭不同林龄天然次生白桦林凋落物分解及养分变化. 植物研究, 2012, 32(4): 492-496.
- [23] 韩营营, 黄唯, 孙涛, 陆彬, 毛子军. 不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量. 生态学报, 2015, 35(5): 1460-1469.
- [24] 王莉, 林莎, 李远航, 陈梦飞, 贺康宁, 童国艳. 青海大通不同林地类型林下植被与土壤水分的关系. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 25-35.
- [25] 陈笑, 李远航, 左亚凡, 林莎, 初鼎晋, 贺康宁. 林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响. 西北植物学报, 2022, 42(8): 1396-1407.
- [26] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 张志强, 王高敏, 朱聿申, 吕志远. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化. 生态学报, 2017, 37(2): 416-424.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.

- [28] 王玮璐, 贺康宁, 张潭, 王先棒, 张震中. 青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响. 植物资源与环境学报, 2020, 29(2): 69-77.
- [29] 井赛, 陈志林, 侯晓巍, 李智华, 胡云云, 向安民, 侯琳. 青海省祁连山圆柏天然林林地土壤生态化学计量特征. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 1-8.
- [30] Acosta-Martínez V, Reicher Z, Bischoff M, Turco R F. The role of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(1): 55-61.
- [31] 杨欣坤, 王宇, 赵兰坡, 张志丹. 土壤水动力学参数及其影响因素研究进展. 中国农学通报, 2014, 30(3): 38-43.
- [32] 张益, 林毅雁, 贾国栋, 余新晓, 王淦淞, 雷自然. 北京山区典型植被类型土壤饱和导水率及其影响因素. 水土保持学报, 2022, 36(6): 171-178.
- [33] Fodor N, Sándor R, Orfanus T, Lichner L, Rajkai K. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*, 2011, 165(1): 60-68.
- [34] Wang T J, Istanbuluoglu E, Wedin D, Hanson P. Impacts of revegetation on the temporal evolution of soil saturated hydraulic conductivity in a vegetated sand dune area. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(11): 7651-7660.
- [35] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 周巧稚, 孔凌霄, 王杰帅, 贾剑波. 黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能. 水土保持学报, 2018, 32(2): 357-363, 371.
- [36] 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 宋立国, 杨洪国, 孙启武. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响. 土壤学报, 2020, 57(1): 239-250.
- [37] Razafindrabe B H, He B, Inoue S, Ezaki T, Shaw R. The role of forest stand density in controlling soil erosion: implications to sediment-related disasters in Japan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160(1/2/3/4): 337-354.
- [38] 孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 张柳桦, 姚小兰, 齐锦秋, 郝建锋. 林分密度对马尾松林下物种多样性和土壤理化性质的影响. 应用生态学报, 2018, 29(3): 732-738.
- [39] Gairola S U, Soni P. Role of soil physical properties in ecological succession of restored mine land-A case study. *International Journal of Environmental Sciences*, 2010, 1(4): 475-480.
- [40] Guo X, Fu B, Ma K, Chen L. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—a case study in Zunghua City of Hebei Province. *Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 557-563.
- [41] 舒韦维, 卢立华, 李华, 农友, 何日明, 陈海, 黄彪. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [42] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 刘锦乾, 齐瑞, 赵阳, 陈学龙. 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质. 林业科学, 2018, 54(10): 20-30.
- [43] 兰道云, 毕华兴, 赵丹阳, 王宁, 云慧雅, 王珊珊, 崔艳红. 晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价. 水土保持学报, 2022, 36(2): 189-196.
- [44] 吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 关晋宏, 时伟宇, 杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(10): 3385-3393.
- [45] 王岳, 王海燕, 李旭, 杨晓娟, 刘玲, 李卫松. 不同密度下近天然落叶松云冷杉林各土层土壤理化特征. 草业科学, 2014, 31(8): 1424-1429.
- [46] Sun W X, Shi X Z, Yu D S, Wang K, Wang H J. Estimation of soil organic carbon density and storage of northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 298-301.
- [47] 卜瑞琰, 梁文俊, 魏曦, 卫舒平, 肖韦江. 不同林分密度华北落叶松林的土壤养分特征. 森林与环境学报, 2021, 41(2): 140-147.
- [48] 李鹏, 陈璇, 杨章旗, 颜培栋, 陈虎, 零天旺, 陆绍浩. 不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响. 水土保持学报, 2022, 36(2): 368-377.
- [49] 李栎, 王光军, 周国新. 会同桢楠人工幼林土壤 C:N:P 生态化学计量的时空特征. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(2): 96-100.
- [50] 朱凯, 李玉灵, 徐学华, 郭江, 程达, 陈海鹏. 不同林龄刺槐林对冀东铁尾矿客土土壤养分含量的影响. 河北农业大学学报, 2016, 39(1): 69-74.
- [51] Fang Z, Li D D, Jiao F, Yao J, Du H T. The latitudinal patterns of leaf and soil C:N:P stoichiometry in the Loess Plateau of China. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 85.
- [52] 王岩松, 马保明, 高海平. 晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 81-93.
- [53] 刘勇, 李国雷, 李瑞生, 郭蓓, 徐扬. 密度调控对油松人工林土壤肥力的影响. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 18-23.
- [54] 林开敏, 俞新妥, 何智英. 不同密度杉木林分生物量结构与土壤肥力差异研究. 林业科学, 1996, 32(5): 385-391.

- [55] Chen Y M, Cao Y. Response of tree regeneration and understory plant species diversity to stand density in mature *Pinus tabulaeformis* plantations in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 238-245.
- [56] Li Z. Application of N:P stoichiometry to ecology studies. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45: 1009-1018.
- [57] 刘文兰, 孙学刚, 焦健, 田青, 曹文侠, 马山虎. 黄河兰州段湿地土壤与甘蒙桂柳叶片碳氮磷生态化学计量特征. *北京林业大学学报*, 2023, 45(6): 43-51.
- [58] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39: 153-170.
- [59] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, Sun H Y, Luo J, Wang J P, Yu D. Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of Eastern Tibetan Plateau. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2): 405-416.
- [60] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139-151.
- [61] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H C, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T L, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428: 821-827.
- [62] 郑笑影, 王东丽, 赵晓亮, 连昭, 王东, 郜姗姗, 谢伟, 郭建军. 菌剂配施有机肥下植物—土壤—微生物生态化学计量特征及内稳性——以内蒙矿区排土场中药复垦模式为例. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 352-362.
- [63] 侯晓巍, 文妙霞, 王海, 刘超, 李智华, 刘欢, 向安民. 青海省祁连圆柏针叶和土壤 C、N、P 生态化学计量及其影响因子. *西北农林科技大学学报*, 2023, 51(2): 53-63.
- [64] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 张学龙, 车宗玺, 敬文茂, 王顺利, 牛赞, 齐鹏, 李雯靖. 祁连山青海云杉林叶片-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. *土壤学报*, 2016, 53(2): 477-489.
- [65] 王贤, 张洪江, 程金花, 张焜, 孙龙, 马西军. 重庆市四面山典型林分土壤饱和导水率研究. *水土保持通报*, 2012, 32(2): 29-34.
- [66] 张昊, 李建平, 王誉陶, 张翼, 张娟, 罗叙, 张茹. 封育与放牧对黄土高原天然草地土壤化学计量特征的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 251-258.
- [67] Zhang W, Qiao W J, Gao D X, Dai Y Y, Deng J, Yang G H, Han X H, Ren G X. Relationship between soil nutrient properties and biological activities along a restoration chronosequence of *Pinus tabulaeformis* plantation forests in the Ziwuling Mountains, China. *Catena*, 2018, 161: 85-95.