

白龙江上游不同林龄粗枝云杉人工林土壤化学计量特征

张 珊,顾振东,陶继新,赵瑞桃,田晓娟,李文涛,安谈红*

(甘肃兴隆山国家级自然保护区管护中心,甘肃 兰州 730117)

摘 要:以白龙江上游不同林龄(20、25、30、35、40、45 a)粗枝云杉人工林土壤为对象,采用野外取样法和室内分析法,测定不同深度(0~20 cm 和 20~40 cm)土壤的有机 C、全 N、全 P、全 K 含量,并分析其化学计量特征,探讨林龄对云杉人工林土壤养分化学计量比的影响及其与土壤养分的相关性,以期通过调节土壤养分含量来提高系统的养分利用效率及云杉人工林的生产力,增强云杉人工林的水源涵养能力。结果表明:1)林龄和土层对云杉人工林土壤养分含量均有显著($P<0.05$)影响。随林龄的增加土壤有机 C 含量呈“W”形变化,土壤全 N、全 P 含量呈“N”形变化,30 a 前的土壤养分较 30 a 后的养分含量低;相同林龄随土层增加土壤养分含量(除全 K 外)均呈现逐渐降低的趋势。2)林龄和土层深度对土壤 C/N、C/P、C/K、N/P 均有显著($P<0.05$)的影响。除 C/P 之外,其他比值随林龄的增加均不稳定,变异系数较高;随土层深度的增加其比值(除 N/P 外)呈降低趋势。由化学计量比值大小得出,研究区土壤缺乏全 N 和全 K,全 P 含量较充足,云杉人工林在 30 a 之前受土壤 P 控制,30 a 之后受土壤 N 控制。3)由相关性分析表明,随着土层深度的增加,土壤 C、N、P、K、C/N、C/P、C/K、N/P 之间的相关系数降低。有机 C 和全 P 是影响 C/N、C/P、C/K、N/P 的关键因子。

关键词:化学计量比;土壤养分;云杉人工林;林龄;白龙江

中图分类号:S154

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)01-0017-08

Soil Ecological Stoichiometry of Spruce Plantation of Age Sequence in Upstream of Bailongjiang River

ZHANG Shan, GU Zhen-dong, TAO Ji-xin, ZHAO Rui-tao, TIAN Xiao-juan, LI Wen-tao, AN Tan-hong*

(Gansu Xinglongshan National Nature Reserve Management Center, Lanzhou 730117, Gansu, China)

Abstract: Soils of spruce (*Picea asperata*) plantations with different stand ages (20, 25, 30, 35, 40, and 45 a) occurring in the upper reaches of the Bailong River were taken as the research objects, the contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in the soils with different depths (0—20 and 20—40 cm) were determined by field sampling and laboratory analysis methods, and their stoichiometric characteristics were analyzed. The aims of this study were to explore the effects of plantation age on the stoichiometric ratio of soil nutrient in spruce plantation and its correlation with soil nutrients, with a view to improve the nutrient use efficiency and the productivity of spruce plantation by adjusting the soil nutrient content, and enhance the water conservation ability of spruce plantation. The results were summarized as follows. 1) The plantation age and soil depth presented significant influences on all the soil nutrients. With the increase of the plantation age, the variation of soil organic carbon presented a "W" shaped curve, and the soil total nitrogen, total phosphorus showed a "N" shaped curve. The nutrients in the soil of more than 30-year-old plantation were higher than those less than 30 years old. Except for the soil potassi-

收稿日期:2021-01-14 修回日期:2021-06-16

基金项目:国家自然科学基金(31800352);甘肃农业大学学科建设专项基金(GAU-XKJS-2018-097)。

第一作者:张 珊,工程师。研究方向:森林生态水文。E-mail:18794820377@163.com

* 通信作者:安谈红,工程师。研究方向:森林生态功能。E-mail:346141757@qq.com

um, the contents of other elements in the soils of the spruce plantations with the same ages decreased with soil depth. 2) The age of plantation and soil depth also presented significant influences on the ratios of soil C/N, C/P, C/K, N/P ($P < 0.05$). Except for the C/P, the ratios of C/N, C/K, N/P decreased with the plantation age, but not stable, and the variation coefficients were higher. The results showed that in the study area, the total nitrogen and total potassium were deficient, and the total phosphorus was sufficient. Soil phosphorus was the controlling factor for the plantations less than 30 years old, while it was nitrogen for those less than 30 years old. 3) The correlation coefficients among soil nutrients (C, N, P, and K) and among soil nutrient ratios (C/N, C/P, C/K, and N/P) decreased with soil depth. Organic carbon and phosphorus were the key factors influencing soil nutrient (C/N, C/P, C/K, N/P) ratios.

Key words: stoichiometry characteristics; soil nutrient; spruce plantation; plantation age; Bailongjiang River

生态化学计量学(ecological stoichiometry)主要强调活有机体 C、N、P 等主要组成元素的关系,并从元素比率的角度把这些不同层次(分子、细胞、有机体、种群、生态系统和全球尺度)的研究理论有机地统一起来^[1-3]。森林生态系统中,土壤作为植物养分的重要来源,对植物的生长发育起着至关重要的作用,对植被群落的组成、结构与生产力水平有直接的影响^[4],而且随着林龄的增加,对森林生态系统的组成结构、内部环境以及土壤性质均会产生改变,从而影响养分分配格局^[5]。因此,研究不同林龄森林生态系统化学计量特征,对揭示植物养分的可获得性以及 C、N、P 等元素的循环和平衡机制具有重要的科学意义^[5],对提升森林生态系统服务功能和森林可持续经营奠定基础^[6-8]。

近年来,国内外学者对森林土壤 C、N、P 化学计量特征进行了大量研究^[9-17],有关不同林龄 C、N、P 化学计量特征的研究也较多^[5,8,18-24]。雷丽群等^[8]对不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)人工林土壤 CNP 生态化学计量特征研究表明,土壤有机 C 含量、全 N 含量均随林龄的递增先降低后增加, N 在不同林龄间和不同土层间的变化是土壤 N:P 变化的主要原因;崔宁浩等^[20]对 5、14、39 a 3 个林龄马尾松人工林的研究却表明,土壤 C、N、P 含量随林龄增加而增加,马尾松人工林受 N 和 P 的共同限制,但林龄对 N、P 养分限制的影响并不显著。由此,林龄对土壤 C、N、P 含量及生态化学计量比的影响以及 C、N、P 养分间的限制性关系仍有不确定性,需要更深入地探讨研究。

白龙江上游林区作为长江上游重要的水源地和生态屏障,有着十分重要的生态地位。粗枝云杉(*Picea asperata*)人工林是白龙江林区森林资源的重要组成部分,在林区的生态环境恢复和经济发展中发挥着较大作用^[25]。目前,有关云杉人工林的研究主要集中于土壤 N 动态及 C 储量^[26]、根系分泌物及微生物量^[27]、林分结构特征及土壤理化性

质^[28]、林下植物种群生态位特征^[29]和地上凋落物对土壤呼吸的贡献^[30]等,对云杉人工林土壤生态化学计量特征的研究可以有效提高白龙江林区可持续发展,但至今无人涉猎。本研究采用野外取样法和室内分析法,以白龙江上游 6 个林龄(20、25、30、35、40、45 a)粗枝云杉人工林为对象,分析了随年龄序列的增长土壤 C、N、P 含量及其化学计量比的分异规律,探讨土壤 C、N、P 含量随林龄的变化趋势及其养分限制性,以期通过调节土壤养分含量来提高系统的养分利用效率及云杉人工林的生产力,增强云杉人工林的水源涵养能力,为云杉人工林可持续经营提供理论依据,并为云杉人工林生态系统化学计量学研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于白龙江上游舟曲林区沙滩林场(103°07'—103°49'E, 33°49'—34°17'N),地处甘肃省南部,青藏高原东北边缘,岷山山系北麓,属北亚热带大陆湿润气候。春季天气多变,地势高,温度低,云雾多,湿度大,夏季常有冰雹,冬季严寒。由于地形复杂,气候垂直变化大,年均气温 6.9℃,极端最高气温 33.8℃,极端最低气温 -18.6℃,年均降水量 700 mm;海拔 1 500~4 900 m,平均坡度 30°~35°,局部可达 50°,割切严重,高山峡谷,是典型的西北高山地形。区域内以粗枝云杉为建群树种,主要树种有:红桦(*Betula albo-sinensis*)、青杆(*Picea wilsonii*)、五角枫(*Acer mono*)、箭竹(*Fargesia spathacea*)、青海云杉(*P. crassifolia*)、杨树(*Populus*)、槭树(*Acer*)、桃(*Amygdalus persica*)、臭樱(*Maddenia hypoleuca*)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)、山梅花(*Philadelphus incanus*)、忍冬(*Lonicera japonica*)、陇塞忍冬(*L. tangutica*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*)及茶藨子(*Ribes nigrum*)

等;主要土壤类型为山地棕色森林土^[31-32]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2014 年 7 月进行实地调查,选取土壤类型、地形地貌、海拔、坡度等立地条件较为一致的粗枝云杉人工林为研究对象,每个林龄选取 3 个林分(同一林龄的 3 块样地之间距离大约为 10 m),每个林分内设置大小为 20 m×20 m 的调查样地,共 18 个样地,四角用木桩标记。样地基本情况见表 1。

1.2.2 土壤样品采集及分析 在所选的各样地内,去除表层的枯落物,采用“S”形布点取样,用直径为

3 cm 的土钻多点采集表层(0~20 cm)和底层(20~40 cm)土样,同一样地同一层次土样混匀后,装入无菌袋中,共获得土壤样品 36 份,采集的土样及时带回实验室,仔细除去其中可见植物残体,土壤样品风干后剔除石头等杂物,研磨并过 0.25 mm 的网筛后测定土壤全量养分含量。

土壤有机 C 采用重铬酸 K 容量法-外加热法测定,全 N 采用不包含硝态 N 和亚硝态 N 的半微量凯式法消化,再用全自动凯氏定 N 仪(KDY-9830, KETUO) 进行测定,全 P 采用钼锑抗比色法测定^[3]。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic status of sampling plots of spruce plantations

样地 编号	林龄 /a	海拔 /m	采样地点	坡向	坡度 /(°)	郁闭度	林分密度 /hm ²	主要树种
D ₁	20	2 610	人命池沟老三段	阴坡	10°	0.7	1 000	粗枝云杉、忍冬、山梅花、红桦、珍珠梅
D ₂	25	2 650	人命池沟四段	半阴	16°	0.7	1 708	粗枝云杉、五角枫
D ₃	30	2 660	人命池沟老三段	半阴	30°	0.9	1 300	粗枝云杉、箭竹、臭樱、悬钩子
D ₄	35	2 300	人命池沟老三段	阴坡	32°	0.8	1 750	粗枝云杉、青杆、林下灌木
D ₅	40	2 460	沙滩林场四分区	半阴	26°	0.85	1 675	粗枝云杉、杨树、槭树、臭樱、
D ₆	45	2 450	沙滩林场四分区	半阴	33°	0.9	1 125	粗枝云杉、臭樱、忍冬、悬钩子

1.2.3 数据处理 用 Excel 2010 进行基本数据统计分析,用 Origin 7.5 作图,方差分析和相关性分析采用 SPSS 17.0 软件 one-way ANOVA 法进行,所有数值均以平均值±标准误的形式表示。对云杉人工林不同林龄土壤的 C、N、P 含量和 C/N、C/P、N/P 等进行 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同林龄云杉人工林土壤养分含量分异特征

由表 2 得出,林龄对云杉人工林土壤养分含量有显著($P<0.05$)影响,其中有机 C 在土层 0~20 cm 处林龄为 20 a 与 25 a 差异性不显著($P>0.05$),与其他林龄均差异性显著($P<0.05$);全 N 在土层 0~20 cm 处林龄 40 a 与 50 a 差异性不显著($P>0.05$),与其他林龄均差异性显著($P<0.05$),土层 20~40 cm 处林龄 20 a 与 25 a 差异性不显著($P>0.05$),与其他林龄均差异性显著($P<0.05$);全 P 在土层 0~20 cm 处林龄 20 a 与 25 a 差异性不显著($P>0.05$),与其他林龄均差异性显著($P<0.05$),土层 20~40 cm 处林龄 30 a 与 45 a 差异性不显著($P>0.05$),与其他林龄均差异性显著($P<0.05$);全 K 在土层 20~40 cm 处林龄 30 a 与 45 a 差异性不显著($P>0.05$),其他林龄均差异性显著($P<0.05$)。云杉人工林不同土层的土壤养分含量随林龄的变化规律不一致,随林龄的增加土壤有机 C 含量呈“W”形变化,土壤全 N、全 P 含量呈“N”形

变化,林龄为 30 a 的云杉人工林区土壤养分(除 K 之外)含量最高;30 a 之前云杉人工林土壤养分含量都较低,这可能是因为云杉人工林在生长初期,由于植株本身的生理机能生长较快对土壤养分的需求量较大,随着林龄的增加 30 a 时,生长相对减缓,自身物质合成量减少^[33],另一方面云杉人工林随着林龄的增加凋落物逐渐积累,而凋落物养分归还还会直接影响土壤 C、N、P 含量,土壤养分含量增加^[33];林龄为 30~45 a 时,由于云杉开始结实,所需的土壤养分量增大,因此土壤养分含量先降低,45 a 时,植物生理结构趋于成熟,对土壤养分需求量减少,再随着植株的长大,凋落物增多,导致土壤养分含量随之上升。

对于 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,随林龄的增加,土壤有机 C、全 N、全 P、全 K 含量均差异显著。随着土层深度增加,相同林龄土壤有机 C、全 N、全 P 含量均呈现逐渐降低的趋势,全 K 含量的变化无明显规律,这可能是因为随土层深度的增加,云杉人工林对土壤养分的吸收量增加,另一方面土壤 C、N 来源主要途径是凋落物分解合成的有机质,首先在表层土壤密集之后随水分或其他介质向土壤下层迁移扩散,因此形成土壤 C、N 含量从表层向下层逐渐降低的分布格局^[34]。林龄为 30 a 的云杉人工林区土壤养分(除 K 之外)含量最高,30 a 前的土壤养分较 30 a 后的养分含量低,说明云杉人工林生长前期需要的土壤养分含量较高(表 2)。

2.2 不同林龄云杉人工林土壤有机 C、全 N、全 P、全 K 的生态化学计量比

由图 1 可知,林龄对于不同土层深度土壤 C/N、C/P、C/K 和 N/P 均有一定的影响,相同林龄不同土层深度土壤养分的化学计量比也有差异。C/N 在土层为 0~20 cm 与 20~40 cm 时,随着云杉人工林林龄(20~45 a)的增加,均呈波动倒“V”形变化,范围分别为 14.89~32.57、7.95~36.70,均值分别为 21.19、16.31,均高于全国土壤 C/N 的平均值 10~12^[35];变异系数分别为 29.3%(中度变异)、64.0%(高度变异),这说明 0~20 cm 土层林龄对土壤 C/N 的影响大于 20~40 cm,原因可能是上层土

壤养分含量随林龄增加变化较下层土壤稳定。土壤有机质 C/N 与其分解速度成反比关系,当 C/N 较高时,土壤有机质分解速率较低,这时微生物需要输入更多的 N 素来满足它们的生长;当 C/N 较低时,超过微生物生长所需的 N 素就会释放到土壤中,土壤的 N 素含量随之增加^[16]。由研究区土壤有机质 C/N 的值说明其分解速率较低,需要补充更多的 N 素,另一方面有机层的 C/N 比较高,表明有机质的矿化作用较慢,从有机层到矿物层,随着土壤厚度的增加 C/N 一般会降低^[6],这就是 0~20 cm 土层土壤 C/N 均值大于 20~40 cm 的原因。

表 2 土壤养分含量

Table 2 Soil nutrient contents

土层/cm	林龄/a	有机 C/(g·kg ⁻¹)	全 N/(g·kg ⁻¹)	全 P/(g·kg ⁻¹)	全 K/(g·kg ⁻¹)
0~20	20	27.57±0.27A	1.48±0.02 A	1.00±0.01 A	9.22±0.00 A
	25	26.33±0.54 A	1.77±0.05 B	1.03±0.00 A	12.22±0.00F
	30	88.60±1.11E	3.89±0.05 D	5.60±0.04 E	9.95±0.00 B
	35	42.66±1.80B	1.33±0.08 A	2.80±0.00 D	11.28±0.01 D
	40	45.94±0.15C	2.59±0.05 C	2.21±0.04 B	11.82±0.00 E
	45	55.20±0.01D	2.69±0.02 C	2.42±0.00 C	10.81±0.00 C
20~40	20	10.72±0.39B	1.17±0.03 C	0.55±0.03 A	8.12±0.00 A
	25	9.31±0.13 A	1.18±0.08 C	0.93±0.01 B	14.15±0.00 E
	30	26.54±0.23 D	2.72±0.01 E	1.84±0.02 D	10.74±0.00 C
	35	30.74±0.40 E	0.84±0.02 B	2.03±0.02 E	12.27±0.00 D
	40	13.00±0.52 C	0.62±0.01 A	1.10±0.03 C	10.15±0.00 B
	45	34.33±0.25 F	2.56±0.02 D	1.80±0.02 D	10.75±0.00 C

注:相同土层同列不同大写字母表示差异显著($P<0.05$),相同大写字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

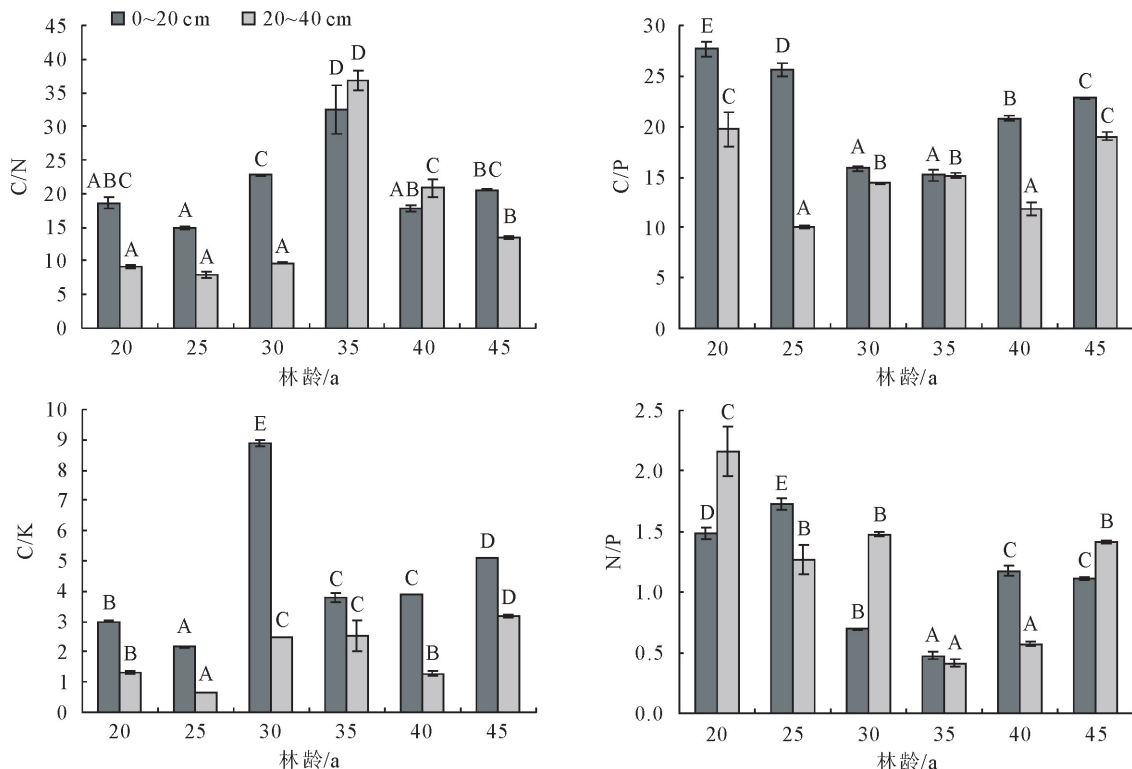


图 1 不同土层有机 C、全 N、全 P、全 K 化学计量特征随林龄的变化

Fig. 1 Variations of organic C, total N, total P, and total K stoichiometry at different soil depths with age

土壤 C/P 随着林龄(20~45 a)的增加,变化趋势不一致,0~20 cm 处呈“V”形变化,在 30 a 和 35 a 时差异不显著,其他各林龄处差异均显著;20~40 cm 时呈“W”形变化,20 a 和 45 a、25 a 和 40 a、30 a 和 35 a 之间差异均不显著;在 25 a 和 35 a 时分别出现最小值,在 20 a 时均出现最大值。土壤 C/K 和 N/P 随林龄的增加值在土层为 0~20 cm 与 20~40 cm 时均没有特定的规律。0~20 cm 时,C/K 在 25 a 和 35 a 处分别出现最小值和最大值,35 a 和 40 a 之间差异性不显著,其他各林龄之间差异显著;N/P 在 35 a 和 20 a 时分别出现最小值和最大值,40 a 和 45 a 处差异性不显著,其他各林龄处差异性均显著。20~40 cm 时,C/K 在 25 a 和 45 a 处分别出现最小值和最大值,20 a 和 40 a、30 a 和 35 a 之间差异性均显著,其他各林龄处差异性均显著;N/P 在 35 a 和 25 a 时分别出现最小值和最大值。0~20 cm 处各林龄 C/P 和 C/K 的值均大于 20~40 cm 处,N/P 在 20、30 a 和 45 a 时 0~20 cm 处 N/P 的值小于 20~40 cm 处,其他各林龄处比值均大于 20

~40 cm 处。
土壤 C/P、C/K、N/P 在两土层随林龄变化的均值分别为 21.34、15.03、4.47、1.90,1.11、1.21,变异系数分别为 22.6%、25.1%、50.1%、47.9%,40.0%、50.4%,均属于中度变异,说明随林龄的增加其比值变化趋势比较明显。这是因为全 K 含量相对稳定,全 P 与全 C、全 N 含量随林龄的增加变化规律基本一致,因而变异性较小。

2.4 土壤有机 C、全 N、全 P、全 K 含量及其生态化学计量比之间的相关性

云杉人工林不同土层土壤全量养分含量及其化学计量比的相关分析表明(表 3、表 4),不同土层土壤全量含量及其化学计量比之间的相关性基本一致,随着土层深度的增加各指标之间的相关系数降低。综合两层土壤分析可知,土壤有机 C、全 N 和全 P 之间呈极显著正相关,土壤 C/N 与 N 呈显著负相关,土壤 C/P 与 C、P 之间均呈极显著负相关,与 P 的相关性大于 C;土壤 C/K 与 C 呈极显著正相关;土壤 N/P 与 P 呈极显著负相关。

表 3 0~20 cm 处土壤全量养分含量及其生态化学计量比之间的关系

Table 3 The relationship between soil total nutrient content and its ecological stoichiometric ratio at 0—20 cm

	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P
C	1							
N	0.901**	1						
P	0.966**	0.798**	1					
K	-0.287	-0.177	-0.261	1				
C/N	0.273	-0.158	0.408	-0.114	1			
C/P	-0.676**	-0.395	-0.804**	-0.092	-0.695**	1		
C/K	0.989**	0.885**	0.957**	-0.415	0.256	-0.619**	1	
N/P	-0.637**	-0.278	-0.746**	0.143	-0.852**	0.932**	-0.604**	1

注: * 表示差异性显著 ($P<0.05$), ** 表示差异性极显著 ($P<0.01$)。下同。

表 4 20~40 cm 处土壤全量养分含量及其生态化学计量比之间的关系

Table 4 The relationship between soil total nutrient content and its ecological stoichiometric ratio at 20—40 cm soil depth

	C	N	P	K	C/N	C/P	C/K	N/P
C	1							
N	0.574*	1						
P	0.924**	0.463	1					
K	0.063	-0.080	0.297	1				
C/N	0.425	-0.476*	0.523*	0.165	1			
C/P	0.394	0.344	0.043	-0.672**	-0.045	1		
C/K	0.975**	0.644**	0.839**	-0.145	0.314	0.541*	1	
N/P	-0.243	0.449	-0.485*	-0.471*	-0.796**	0.562*	-0.090	1

3 结论与讨论

3.1 结论

相同林龄随着土层深度增加土壤养分含量(除全 K 外)均呈现逐渐降低的趋势;林龄对云杉人工林土壤养分含量也有显著的影响;随林龄的增加土

壤有机 C 含量呈“W”形变化,土壤全 N、全 P 呈“N”形变化,30 a 前的土壤养分较 30 a 后的养分含量低。

林龄对于不同土层土壤 C/N、C/P、C/K、N/P 均有显著的影响,其比值除 C/P 外均不稳定,变异系数较大;不同土层土壤养分的化学计量特征也有

差异:除了 N/P 之外,其他土壤养分化学计量比平均值随土层深度的增加而降低。由土壤 C/N、C/P、C/K、N/P 得出研究区土壤中需要补充更多的 N 素,P 含量较充足,K 含量比较匮乏,云杉人工林在 30 a 之前受土壤 P 控制,在 30 a 之后受土壤 N 控制。

不同土层土壤全量含量及其化学计量比之间的相关性基本一致,随着土层深度的增加土壤 C、N、P、K、C/N、C/P、C/K、N/P 之间的相关系数降低。有机 C 和全 P 是影响 C/N、C/P、C/K、N/P 的关键因子。

3.2 讨论

3.2.1 云杉人工林土壤养分含量随林龄的变化

云杉人工林相同林龄土壤养分含量随着土层深度增加(全 K 变化无明显规律)呈现逐渐降低的趋势,这与以往研究一致^[6,8,16,18]。土壤养分含量在不同土层变化规律均不一致,这可能是因为不同林龄的云杉人工林对土壤养分的需求量有差别。

由方差分析可知,林龄对云杉人工林土壤养分含量均有显著的影响。总体来看,随林龄的增加土壤有机 C 含量呈“W”形变化,土壤全 N、全 P 含量呈“N”形变化,全 K 含量相对较少,这与曹娟等^[18]对湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤 C、N、P 化学计量特征中得出随林龄增加土壤有机 C 呈降低趋势、土壤 N 呈增加趋势、P 无明显变化的结论相悖;与崔宁洁等^[20]对不同林龄马尾松人工林 CNP 分配格局中所得土壤 C、N、P 含量随林龄增加而得到积累的结论不一致,可能是因为研究所选的植被种类和年龄阶段不一样而导致。当林龄为 30 a 的云杉人工林区土壤养分(除 K 之外)含量最高;30 a 之前云杉人工林土壤养分含量都较低,因此在人工林生长初期是养分缺乏期,增加土壤养分含量可促进植株生长速率。

3.2.2 云杉人工林土壤养分化学计量比随林龄的变化 土壤 C/N、C/P、C/K、N/P 等是有机质或其他成分中 C 素与 N 素、P 素总质量的比值,在一定程度上可以反映有机质的分解与积累,土壤肥力的指标可用一定范围内 N、P 的富集和有效性来衡量,从而影响植物对养分吸收,进而影响其生长发育^[19]。

云杉人工林林龄对于不同土层厚度土壤 C/N、C/P、C/K、N/P 均有一定的显著影响,其比值均不稳定(除 C/P 之外),变异系数较大,这与崔宁洁等^[20]对不同林龄马尾松人工林 CNP 分配格局中所得土壤 C/N、C/P、N/P 随林龄增长无显著变化的结论和曹娟等^[18]对湖南会同 3 个林龄杉木人工林

土壤 C、N、P 化学计量特征中得出随林龄增加土壤 C/N、C/P、N/P 逐渐增高的结论均相悖,这是由于其土壤 C、N、P 含量随林龄的变化不一致引起的。不同土层土壤养分的化学计量特征也有差异:除了 N/P 之外,其他土壤养分化学计量比平均值在土层为 0~20 cm 时均大于 20~40 cm,这与罗亚勇等^[13]对不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征和秦娟等^[16]对马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征研究出的表层土壤 C、N、P、K 化学计量比大于深层土壤的结论一致。土壤有机质 C/N 与其分解速度成反比关系,研究区土壤有机质 C/N 的值说明其分解速率较低,需要补充更多的 N 素;土壤 C/P 是衡量微生物矿化土壤有机物质释放 P 或从环境中吸收固持 P 素潜力的一个指标^[24],研究区 C/P 的值均低于我国土壤 C/P 的平均值 105^[35]。由秦娟等^[16]研究可知,当土壤 C/P<200 时,土壤微生物体 C 素的短暂增加和有机 P 的净矿化,从而使土壤中的 P 含量增加,因此研究区土壤中的 P 含量较充足。研究区土壤 C/K 的均值较朱秋莲等^[6]得出的 C/K 平均值(0.26)大很多,原因是土壤 K 含量少而稳定,C/K 的值受有机 C 影响,另一方面研究区土壤 K 含量较全国土壤 K 含量^[34]水平低。土壤 N/P 可以作为养分限制类型的有效预测指标,较低的 N/P 一般反映植物受到 N 限制,较高的 N/P 反映植物受到 P 限制^[36]。由 N/P 的变异系数可知,随林龄的增加土壤 N/P 之间的差异显著,说明了不同林龄人工云杉之间存在不同的养分限制类型,与其均值比较得出:云杉人工林在 30 a 之前受土壤 P 控制,在 30 a 之后受土壤 N 控制。

在人工林的抚育管理中,特别是在云杉人工林幼林期,应该合理施用 N、P、K 肥以改善土壤养分供给状况。同时也可引入固 N 植物以提高地力,促进云杉人工林的生长发育。

3.2.3 土壤有机 C、全 N、全 P、全 K 含量及其生态化学计量比之间的相关性 有关土壤全量养分及其生态化学计量比之间的相关性的研究较多,但所得结论相互存在差异^[6,15-20]。本研究相关性分析表明,土壤有机 C、全 N 和全 P 之间呈极显著正相关,这与秦娟等^[16]得出的结论一致,与朱秋莲等^[6]得出的土壤有机 C 和全 N 呈极显著正相关的结论一致,与全 N 和全 P 极显著正相关的结论相悖,这可能是因为土壤类型及植被类型不一样导致。C/N 与全 N 的相关性较大;C/P 与有机 C 含量的相关性小于全 P 含量,表明研究区云杉人工林土壤 C/P 主要受土壤 P 含量的影响,C/K 主要受土壤 C 含量的影响,N/P 主要受土壤 P 含量的影响,且呈负相关

关系。这表明有机 C 和全 P 是影响 C/N、C/P、C/K、N/P 的关键因子,这与雷丽群^[8]和白小芳等^[19]等得出有机 C、全 N 是影响 C/N、C/P 和 N/P 的关键因子的结论有差异,这可能是因为研究地所选植被类型和林龄及环境引起的。

为了更深入探讨云杉人工林土壤养分随林龄的变化规律,提高云杉人工林对土壤养分的利用率,进而提高云杉人工林的林分生产力,增强水源涵养力,在今后的试验中需要对 45 a 后的云杉人工林土壤养分进行分析,比较其幼龄林、中幼林、近熟林等各龄级土壤养分的变化;以土壤化学计量作为衡量植物养分匮乏的标准有待完善,在今后试验中应该将植物、凋落物、土壤作为一个完整的系统来探讨 C、N、P 元素化学计量比在整个系统中的变化格局及其相互作用。

参考文献:

- [1] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学/复杂生命系统奥秘的探索[J].植物生态学报,2005,29(6):1007-1019.
- [2] 程滨,赵永军,张文广,等.生态化学计量学研究进展[J].生态学报,2010,30(6):1628-1637.
- [3] ELSER J J, ACHARYA K, KYLE M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. Ecology Letters, 2003(6):936-943.
- [4] 刘蓉,张卫国,江小雷,等.垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究[J].草业科学,2010,27(10):96-103.
- [5] 淑敏,王东丽,王凯,等.不同林龄樟子松人工林针叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J].水土保持学报,2018,32(3):174-179.
SHU M, WANG D L, WANG K, et al. Ecological stoichiometry characteristics of needle Leaves-Litter-Soils in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different stand ages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3):174-179. (in Chinese)
- [6] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [7] CAO Y, CHEN Y. Ecosystem C/N/P stoichiometry and carbon storage in plantations and a secondary forest on the Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2017, 105:125-132.
- [8] 雷丽群,卢立华,农友,等.不同林龄马尾松人工林土壤 CNP 生态化学计量特征[J].林业科学研究,2017,30(6):954-960.
LEI L Q, LU L H, NONG Y, et al. Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of *Pinus massoniana* plantations at different age stages [J]. Forest Research, 2017, 30(6):954-960. (in Chinese)
- [9] BEERMANN F B, TELTEWSKOI A, FIENCKE C, et al. Stoichiometric analysis of nutrient availability (N, P, K) within soils of polygonal tundra[J]. Biogeochemistry, 2015, 122(2/3):211-227.
- [10] YANG Y H, LUO Y Q. Carbon/Nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development[J]. Global Ecology & Biogeography, 2011, 20(2):354-361.
- [11] YANG Y H, LUO Y Q, Finzi A C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development/a global synthesis [J]. New Phytologist, 2011, 190(4):977-989.
- [12] FAN H B, WU J P, LIU W F, et al. Linkages of plant and soil C/N/P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations[J]. Plant and Soil, 2015, 392(1/2):127-138.
- [13] 罗亚勇,张宇,张静辉,等.不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J].生态学杂志,2012,31(2):254-260.
LUO Y Y, ZHANG Y, ZHANG J H, et al. Soil stoichiometric characteristics of alpine meadow in different degradation stages[J]. Journal of Ecology, 2012, 31(2):254-260. (in Chinese)
- [14] 董从国,乔雨宁,曹扬,等.黄土高原不同植被带油松人工林生态化学计量特征及其影响因素[J].西北林学院学报,2020,35(3):1-8.
DONG C G, QIAO Y N, CAO Y, et al. Ecological stoichiometric characteristics and Its influential Factors in *Pinus tabulaeformis* plantation under different vegetation zones in the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3):1-8. (in Chinese)
- [15] 孟庆权,葛露露,林宇,等.格氏栲天然林及人工林和杉木人工林生活叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J].西北林学院学报,2019,34(6):8-15.
MENG Q Q, GE L L, LIN Y, et al. Ecological stoichiometric characteristic leaf-litter-soil in natural and planted forests of *Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6):8-15. (in Chinese)
- [16] 秦娟,孔海燕,刘华.马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(2):68-76,82.
QIN J, KONG H Y, LIU H. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P, K in different forest types of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2016, 44(2):68-76, 82. (in Chinese)
- [17] 张向茹,马露莎,陈亚南,等.黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J].土壤学报,2013,50(4):818-825.
ZHANG X R, MA L S, CHEN Y N, et al. Ecological stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* forest soil in different latitudes of Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4):818-825. (in Chinese)
- [18] 曹娟,闫文德,项文化,等.湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J].林业科学,2015,51(7):1-8.
CAO J, YAN W D, XIANG W H, et al. Stoichiometry characterization of soil C, N and P of Chinese fir plantations at three different ages in Hui tong, Hunan Province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7):1-8. (in Chinese)
- [19] 白小芳,徐福利,王渭玲,等.华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):68-75.
BAI X F, XU F L, WANG W L, et al. Ecological stoichiomet-

- ry of soil carbon,nitrogen and phosphorus in a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Science of Soil and Water Conservation,2015,13(6):68-75. (in Chinese)
- [20] 崔宁洁,刘小兵,张丹桔,等. 不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J]. 生态环境学报,2014,23(2):188-195.
- CUI N J,LIU X B,ZHANG D J,*et al.* Distribution patterns and stoichiometric characteristics of carbon,nitrogen and phosphorus in *Pinus massoniana* plantations of different ages[J]. Journal of Eco-Environment,2014,23(2):188-195. (in Chinese)
- [21] 靖磊,周延,吕偲,等. 洞庭湖湿地3个林龄杨树人工林叶与土壤CNP生态化学计量特征[J]. 生态学报,2018,38(18):6530-6538.
- JING L,ZHOU Y,LÜ C,*et al.* Ecological stoichiometric characteristics of leaf and soil CNP of three-age *Poplar* plantation in Dongting Lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(18):6530-6538. (in Chinese)
- [22] 冀盼盼,张健飞,张玉珍,等. 不同林龄华北落叶松人工林生态化学计量特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2020,44(3):126-132.
- JI P P,ZHANG J F,ZHANG Y Z,*et al.* Ecological stoichiometry characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantations at different ages[J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition,2020,44(3):126-132. (in Chinese)
- [23] 陈安娜,王光军,陈婵,等. 亚热带不同林龄杉木林叶-根-土NP化学计量特征[J]. 生态学报,2018,38(11):4027-4036.
- CHEN A N,WANG G J,CHEN C,*et al.* NP stoichiometric characteristics of leaf-root-soil in different ages of Chinese fir forest in subtropical[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):4027-4036. (in Chinese)
- [24] 刘顺,盛可银,文哲,等. 不同林龄陈山红心杉根际与非根际土壤C、N、P化学计量特征[J]. 江西农业大学学报,2018,40(4):725-733.
- LIU S,CHENG K Y,YUN Z,*et al.* The stoichiometric characteristics of C,N,P in rhizosphere and non-rhizosphere soils of Chenshan red fir in different ages[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University,2018,40(4):725-733. (in Chinese)
- [25] 王会儒,张涛,霍怀成,等. 白龙江林区人工云杉林近自然经营技术初探[J]. 甘肃科技,2014,30(7):144-146,119.
- [26] 姜发艳,孙辉,林波,等. 川西亚高山云杉人工林恢复过程中表层土壤C动态变化[J]. 应用生态学报,2009,20(11):2581-2587.
- [27] 李娇,蒋先敏,尹华军,等. 不同林龄云杉人工林的根系分泌物与土壤微生物[J]. 应用生态学报,2014,25(2):325-332.
- LI J,JIANG X M,YIN H J,*et al.* Root exudates and soil microorganisms of spruce plantations of different ages[J]. Journal of Applied Ecology,2014,25(2):325-332. (in Chinese)
- [28] 冯宜明,李毅,曹秀文,等. 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的分结构特征及土壤理化性质[J]. 林业科学,2018,54(10):20-30.
- FENG Y M,LI Y,CAO X W,*et al.* Characteristics of stand structure and soil physicochemical properties of artificial young *Picea asperata* plantation with different densities in southern Gansu[J]. Scientia Silvae Sinicae,2018,54(10):20-30. (in Chinese)
- [29] 冯宜明,陈学龙,齐瑞,等. 甘肃亚高山云杉人工林下植物种群生态位特征[J]. 草业科学,2018,35(4):807-815.
- FENG Y M,CHEN X L,QI R,*et al.* Niche characteristics of the primary understory populations of a *Picea asperata* plantation in the subalpine region of Gansu Province[J]. Pratacul-tural Science,2018,35(4):807-815. (in Chinese)
- [30] 熊莉,徐振锋,杨万勤,等. 川西亚高山粗枝云杉人工林地上凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. 生态学报,2015,35(14):4678-4686.
- [31] 李兴民,车克钧,杨永红,等. 白龙江上游不同海拔森林土壤养分变化规律研究[J]. 甘肃农业大学学报,2014,49(6):131-137.
- LI X M,CHE K J,YANG Y H,*et al.* Study on variation laws of forest soil nutrients at different altitudes in the upper Bailong River[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2014,49(6):131-137. (in Chinese)
- [32] 丁全定,杨永红,刘锦乾,等. 白龙江上游水源涵养林植物多样性及土壤养分特征研究[J]. 陕西林业科技,2014,(5):5-10.
- [33] 李婷,邓强,袁志友,等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤C、N、P化学计量学特征[J]. 环境科学,2015,36(8):2988-2996.
- LI T,DENG Q,YUAN Z Y,*et al.* Stoichiometric characteristics of C,N and P in plants and soils on the latitude gradient of the Loess Plateau[J]. Environmental Science,2015,36(8):2988-2996. (in Chinese)
- [34] 杨好运,贾国梅,杜祥运,等. 不同林龄柑橘园CNP分配及生态化学计量特征研究[J]. 湖北农业科学,2016,55(6):1402-1405.
- [35] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [36] 王平安,宫渊奇,王琪武,等. 不同林龄华北落叶松人工林针叶-凋落叶-土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 西北林学院学报,2020,35(6):1-9.
- WANG P A,GONG Y Q,WANG Q W,*et al.* Carbon,Nitrogen and Phosphorus stoichiometry characteristics of needle leaf-leaf litter-soil from *Larix principis-rupprechtii* plantations with different stand ages[J]. Journal of Northwest Forestry University,2020,35(6):1-9. (in Chinese)
- [37] 刘兴诏,周国逸,张德强,等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中N、P的化学计量特征[J]. 植物生态学报,2010,34(1):64-71.
- LIU X Z,ZHOU G Y,ZHANG D Q,*et al.* N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(1):64-71. (in Chinese)