doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.03.002

高强度间伐对马尾松叶片与土壤养分关系的影响

周冬兰[1],王鑫晨[1],卢建[1],吴旭冬[1*],赵薇[2],俞飞[2]
(1.浙江省龙泉市林业局,浙江 龙泉 323700;2.浙江农林大学 林业与生物技术学院,浙江 临安 311300)

摘　要:为研究高强度间伐对马尾松(*Pinus massoniana*)叶片与土壤养分关系的影响,以间伐后 5 a 和未间伐(对照)马尾松人工林为研究对象,分析叶片和 0~60 cm 土壤理化性质和氮、磷化学计量特征,以及叶片与土壤氮磷的相关性。结果表明,高强度间伐显著降低马尾松人工林的土壤含水量,提高土壤 pH,并且降低 0~20 cm 土层全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量,对 20~40 cm 土层氮、磷含量影响不显著。高强度间伐对马尾松叶片氮含量影响不显著,显著降低叶片磷含量,导致叶片氮磷比升高 50%。对照马尾松叶片氮含量与 10~40 cm 土层碱解氮含量显著相关,间伐后相关性不显著。间伐和对照马尾松叶片磷含量与土壤速效磷含量相关性均不显著。说明研究区马尾松生长主要受到氮限制,高强度间伐在短期内降低了土壤氮、磷含量,并缓解了马尾松生长的氮限制。

关键词:马尾松;生态化学计量;土壤;养分;间伐
中图分类号:S753.3; S714　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)03-0011-09

Effects of Thinning on Leaf-soil Nitrogen and Phosphorus Relationships in Masson Pine Plantation

ZHOU Donglan[1], WANG Xincheng[1], LU Jian[1], WU Xudong[1*], ZHAO Wei[2], YU Fei[2]
(1. Longquan Forestry Bureau of Zhejiang Province, Longquan 323700, China; 2. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China)

Abstract: To reveal the effects of high intensity thinning on leaf-soil nutrient relationships in Masson pine (*Pinus massoniana*) plantation, the physical and chemical properties, nitrogen (N) and phosphorus (P) stoichiometric characteristics, as well as the correlation between leaves and soil nitrogen and phosphorus were analyzed in *P. massoniana* plantations 5 years after thinning and non thinning (control). The results showed that high intensity thinning significantly increased soil pH, decreased soil water content, total N, total P, available N, and available P content in the soil at 0-20 cm, and had no significant effects on the N and P content in the soil at 20-40 cm. High intensity thinning did not significantly affect leaf N content but significantly reduced leaf P content, resulting in a 50% increase in leaf N:P ratio. In the control treatments, leaf N content was positively correlated with available N content in the soil at 10-40 cm, but this correlation was not significant after thinning. The correlation between leaf P content and available P content in the soil was not significant both in the thinning and control treatments. Therefore, N is the limiting factor for *P. massoniana* growth in the study area, and high intensity thinning relieved the N limitation on *P. massoniana* growth.

Keywords: *Pinus massoniana*; stoichiometry; soil; nutrient; thinning

0　引言

大径材培育是我国木材战略储备安全体系构建的重要内容,间伐作为调节林分生产力和保持生态功能的有效手段,被广泛用于大径材林营造[1]。间伐主要通过降低林分密度和叶面积,改变林内环境,促进林下植被生长,影响凋落物分解和养分释放,将竞争引起的能量消耗转化为有效生产力[1-2]。但是大径材培育采用的间伐强度较大,往往导致森林凋落物输入量急剧下降、林内光照大幅度增强、湿度显著降低,出现土壤养分含量在间伐初期迅速降低的现象。这在高强度间伐后的针阔混交次生林、杉木人工林和马尾松人工林中均有出现[3-5]。土壤养分急剧下降是否会导致林分生长从光限制转向土壤养分限制,这是大径材培育中需要关注的问题。

叶片氮(N)、磷(P)含量以及 N∶P 反映了植物生长和发育中 N 和 P 的平衡,并经常用于推断对初

收稿日期:2023-11-13
基金项目:浙江省自然科学基金项目(LQ17C160004)。
第一作者简介:周冬兰,工程师。研究方向为人工林。E-mail: 809884630@qq.com
*通信作者:吴旭冬,工程师。研究方向为森林生态。E-mail: 454797250@qq.com
引文格式:周冬兰,王鑫晨,卢建,等. 高强度间伐对马尾松叶片-土壤养分关系的影响[J].森林工程,2024,40(3):11-19.
ZHOU D L, WANG X C, LU J, et al. Effects of thinning on leaf-soil nitrogen and phosphorus relationships in Masson pine plantation [J]. Forest Engineering, 2024, 40(3):11-19.

级生产力可能存在的养分限制[6-7]。过去20 a的研究表明,叶片的N∶P明显受到生物和非生物干扰的影响。大量研究表明间伐后,植物N、P含量以及化学计量学通常会因林分环境、植被和凋落物的变化而变化,这可能是植物应对间伐后环境产生的适应性调节[8-9]。过去的研究主要关注间伐对植物或者土壤养分的单独影响,近年来开始转向植物-土壤养分耦合分析。因为与单纯的植被或者土壤养分研究相比,植被与土壤养分关系能够进一步反映群落的养分利用策略、环境适应性、养分保持功能和生态系统的协调发展程度等特征[10]。

在大径材培育过程中,关于间伐后土壤养分供给变化,植被养分利用策略调整,植被-土壤养分循环的研究较少,不利于间伐后大径材培育的科学管理。尤其是我国南方丘陵地区,土壤P素匮乏且水热条件丰沛,高强度间伐后更有可能引起养分的快速分解和流失,引起植被-土壤养分耦合关系的变化[11]。因此,本研究以我国南方重要树种马尾松(*Pinus massoniana*)为对象,探讨间伐对不同深度土壤养分与叶片N、P化学计量特征关系的影响,可以为大径材培育的可持续经营和养分管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省龙泉市兰巨乡(中心定位为27°59′37″N, 119°04′09″E),气候垂直变化较大,海拔800 m以下为凉亚热带湿润季风气候,海拔800 m以上为属暖温带湿润季风气候,年平均气温17.6 ℃,其中7月平均气温27.9 ℃,1月平均气温6.5 ℃,年平均降水量1 648 mm。全市森林覆盖率84.2%。森林类型为中亚热带常绿阔叶林,海拔800 m以下以壳斗科、樟科和山茶科等树种为主要建群种。马尾松(*Pinus massoniana*)林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林穿插其中。森林土壤类型主要为山地黄壤、红壤,土层厚度40~200 mm,土壤母岩为花岗岩[12]。

1.2 研究方法

研究区马尾松林营造于1992年,为1年生幼苗植苗造林,造林密度每亩166株,株行距2 m×2 m,2017年对部分林分开展了以大径材培育为目的的间伐,株数间伐强度为44%~57%。马尾松间伐期间去除林下灌木和草本,间伐后未开展过林下抚育和其他作业。2022年9月选择间伐样地(T)和未间伐样地(对照,CK)进行叶片和土壤养分变化研究。每个样地中分别选择立地条件基本一致的样方3个,每个样方20 m×20 m,样方间隔15 m,共计6个样方。样方基本情况见表1。对照马尾松林下灌木层盖度50%,草本层盖度90%。间伐马尾松林下灌木层盖度30%,草本层盖度35%。

1.3 样品采集与处理

在每个样方内选择健康马尾松3株,分别采集每棵马尾松冠层南方向中部枝条上健康、完整的当年生针叶2束带回试验室。将叶片置于烘箱中,105 ℃杀青,然后70 ℃烘干至恒质量,粉碎、过孔径为2 mm的筛后备用。在各样方内按照"S"形取5个土样,取样土钻直径为5 cm,取样深度分别为0~10、10~20、20~40、40~60 cm。将每个土层的5个样品充分混合形成4个样品,按照四分法取四分之一,去除动植物残体后带回试验室风干、研磨,过孔径为2 mm的筛,用于测定土壤养分含量。

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic situation of the plots

样地 Plots	坡向 Slope aspect	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	林分密度/(株·hm^{-2}) Density	平均林龄/a Mean Age	平均胸径/cm Mean DBH	郁闭度 Canopy density	凋落物厚度/cm Litter thickness
对照1 CK1	西北	19	263	1 100	31	17.08	0.85	10.6
对照2 CK2	西	24	271	1 075	31	17.41	0.87	11.5
对照3 CK3	西	25	287	1 250	31	14.59	0.86	10.8
间伐1 T1	西北	28	297	475	31	24.12	0.50	2.4
间伐2 T2	西北	23	225	600	31	21.89	0.53	3.0
间伐3 T3	西北	27	274	600	31	22.85	0.52	2.7

样品养分含量测定主要参考鲁如坤[13]的方法,其中,叶片和土壤全氮采用凯氏定氮法测定,土壤全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定,叶片全磷采用钒钼黄比色法测定。土壤碱解氮测定采用碱解氮扩散法,土壤速效磷测定采用双酸浸提-钼锑抗比色法。土壤含水量测定采用环刀法,pH 采用 pH 计测定[14]。

1.4　数据处理

采用最小显著极差法(LSD 法)比较不同土层养分化学计量特征差异,以及不同处理叶片、土壤养分化学计量特征差异。采用线性回归分析研究叶片与土壤养分化学计量特征的相关性。所有数据在分析前进行正态性检验和方差同质性检验,部分数据进行对数转换。采用 R 4.1.3 version 软件进行统计分析,并用 Sigmaplot 13.0 软件作图。

2　结果与分析

2.1　土壤理化性质的变化

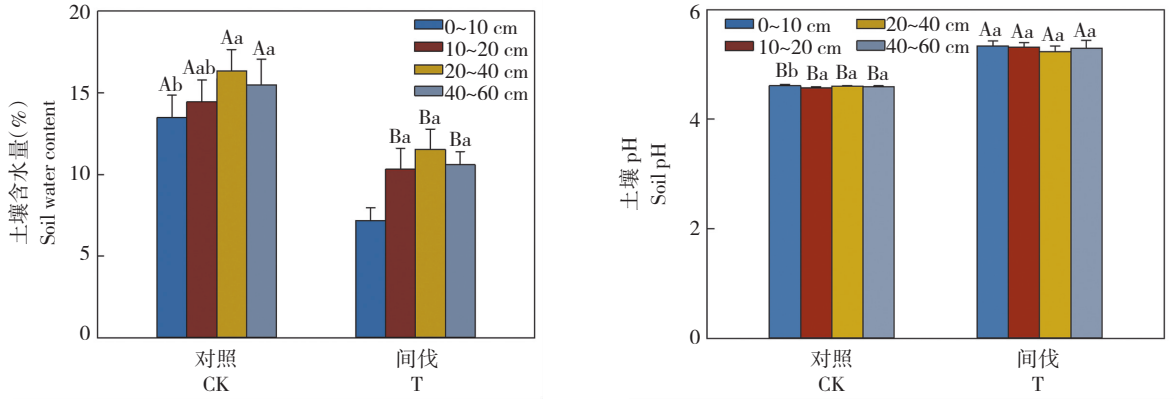
间伐极显著降低了马尾松林土壤含水量,提高了土壤 pH。由图 1 可知,间伐后 0~60 cm 各土层含水量比对照降低了 29%~47%($P<0.01$),其中 0~10 cm 土层含水量下降最多,导致其显著低于 10~60 cm 土层含水量。但是间伐极显著提高了土壤 pH,各土层土壤 pH 均比对照高 15%左右($P<0.01$)。对照和间伐马尾松林下土壤氮磷含量总体随土层深度增加而降低,而且间伐显著降低了 0~20 cm 土壤全氮含量、碱解氮含量和速效磷含量,显著降低了 0~10 cm 土壤全磷含量,如图 2 所示。间伐后,0~10 cm 和 10~20 cm 土壤全氮含量比对照分别降低了 30.59%和 32.34%($P<0.01$),碱解氮含量分别比对照降低了 23.37%和 24.64%($P<0.01$);土壤全磷含量比对照降低了 20.29%和 16.67%($P<0.05$),速效磷含量分别比对照降低了 18.74%和 20.11%($P<0.05$)。同时,间伐还显著降低了 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤全氮与全磷含量比($P<0.05$)。由此可见,间伐对马尾松土壤氮磷养分的影响主要发生在 0~20 cm 土壤中,对 20~60 cm 土壤的影响较小。

2.2　叶片氮磷化学计量特征的变化

与对照相比,间伐后马尾松叶片氮含量变化不大,但是叶片磷含量极显著降低,导致叶片氮磷比极显著升高($P<0.01$),如图 3 所示。间伐叶片氮含量略高于对照,磷含量比对照降低了 30.31%,氮磷比是对照的 1.52 倍。由此可见,间伐后马尾松生长受氮元素限制降低,磷元素限制增加。

2.3　叶片与土壤氮磷化学计量特征相关性的变化

间伐改变了马尾松叶片与土壤的氮化学计量特征的相关性,如图 4 所示。对照中,马尾松叶片氮含量与 10~60 cm 土层碱解氮含量显著正相关($P<0.05$),如图 4(b)—图 4(d),但是与 0~10 cm 土层碱解氮



(a) 间伐对土壤含水量的影响
(a) Effects of thimning on soil water content

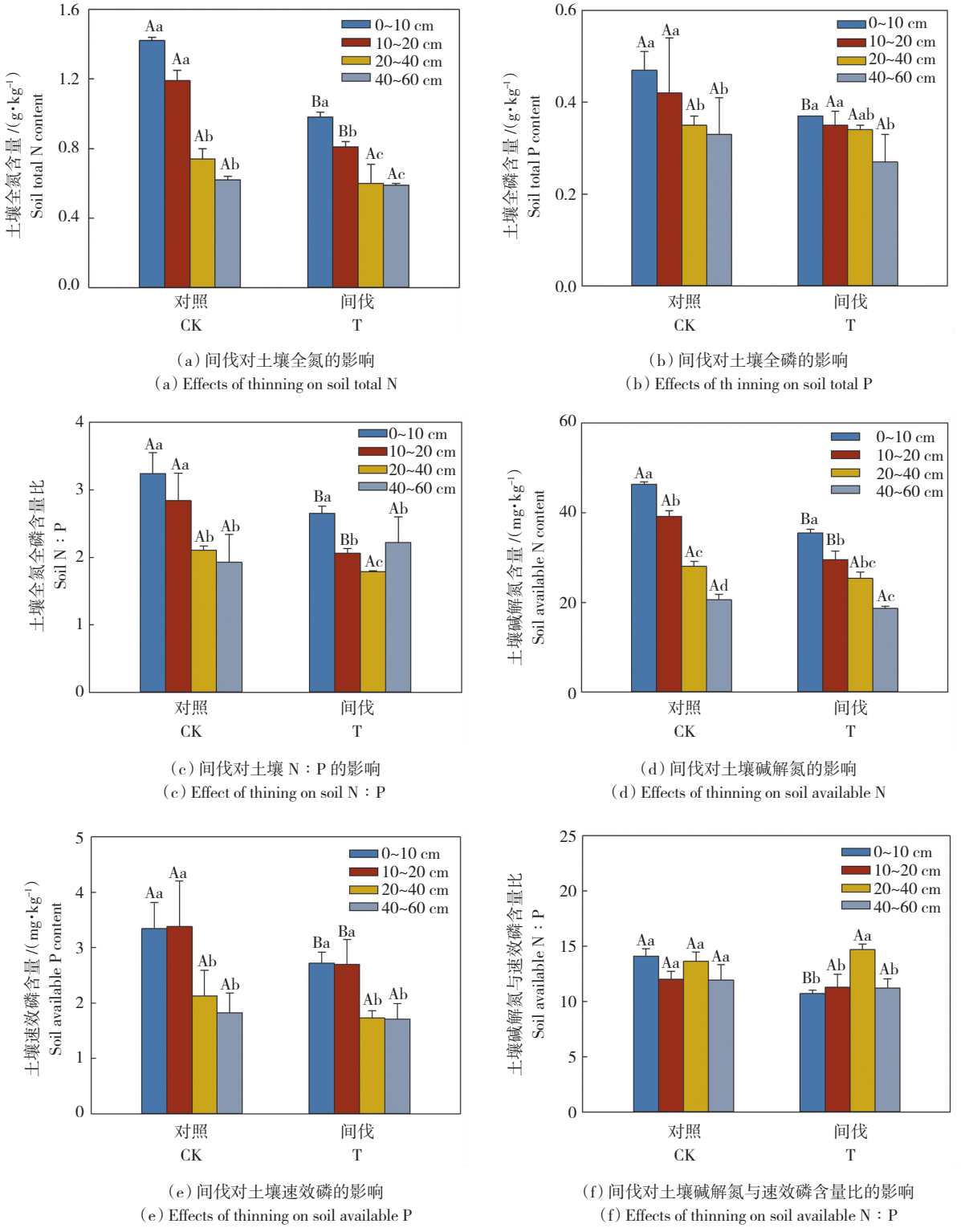
(b) 间伐对土壤 pH 的影响
(b) Effects of thinning on soil pH

大写字母表示对照(CK)与间伐(T)的组间差异,小写字母表示同一处理的组内差异,下同

Uppercase letters indicate inter-group differences between control (CK) and thinning (T), and lowercase letters indicate intra-group differences for the same treatment. The same bellow

图 1　间伐对土壤含水量和 pH 的影响

Fig. 1 Effects of thinning on soil water content and pH



(a) 间伐对土壤全氮的影响
(a) Effects of thinning on soil total N

(b) 间伐对土壤全磷的影响
(b) Effects of th inning on soil total P

(c) 间伐对土壤 N：P 的影响
(c) Effect of thining on soil N：P

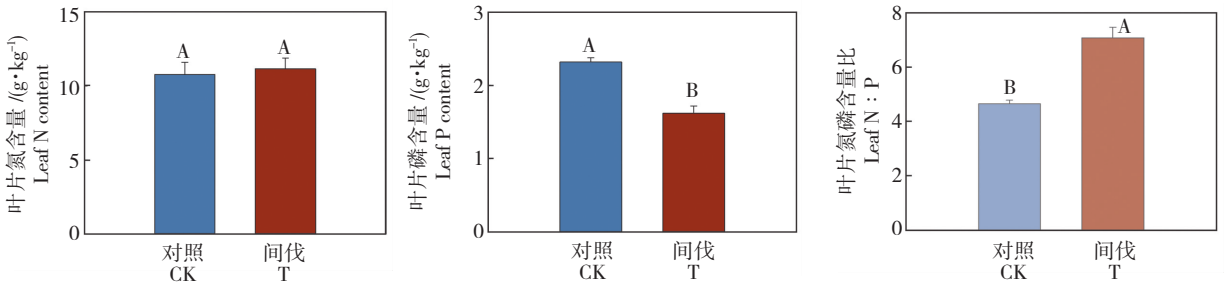
(d) 间伐对土壤碱解氮的影响
(d) Effects of thinning on soil available N

(e) 间伐对土壤速效磷的影响
(e) Effects of thinning on soil available P

(f) 间伐对土壤碱解氮与速效磷含量比的影响
(f) Effects of thinning on soil available N：P

图 2 间伐对土壤氮、磷化学计量特征的影响

Fig. 2 Effects of thinning on soil N and P stoichiometry

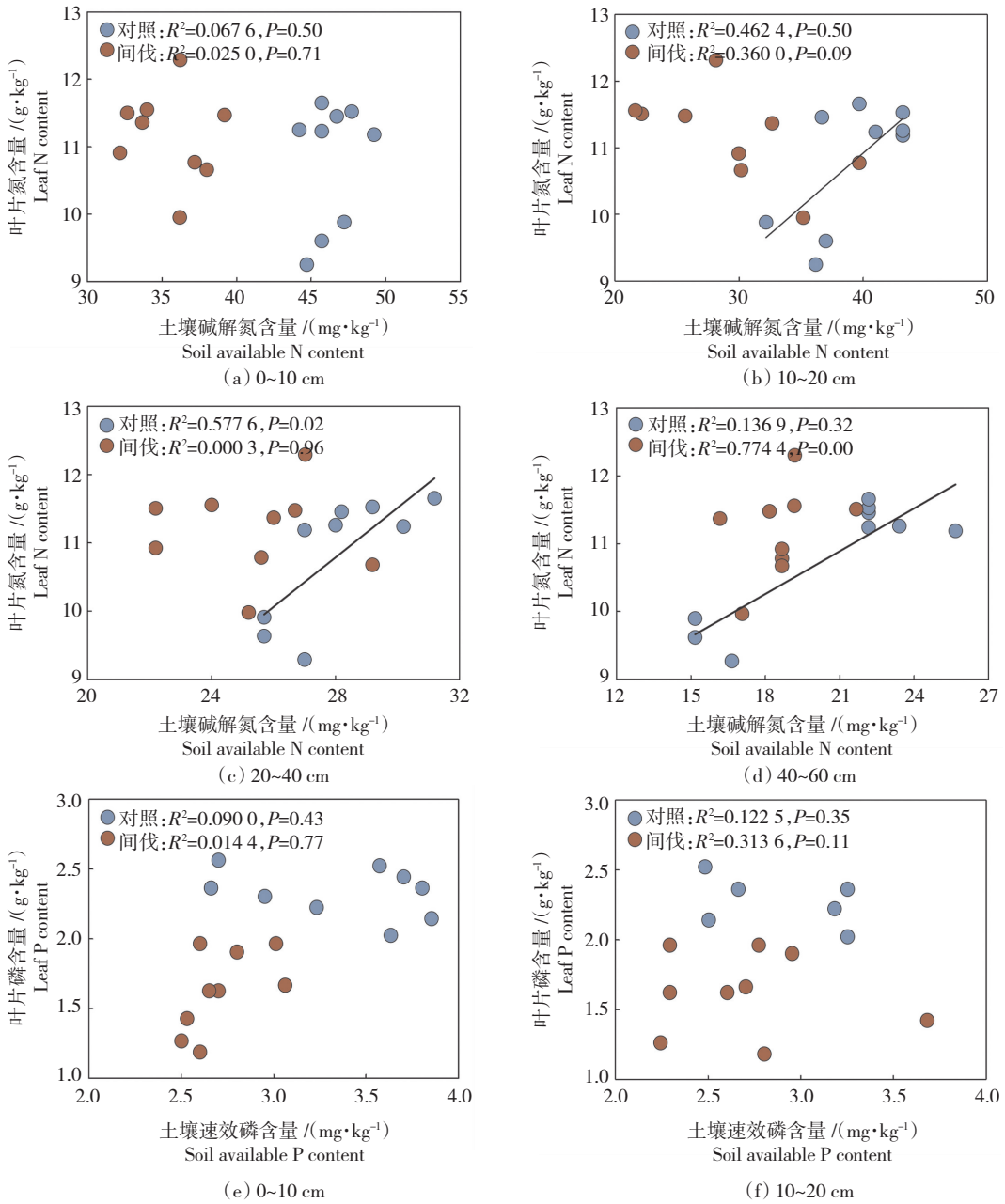


(a) 间伐对叶片氮的影响　(b) 间伐对叶片磷的影响　(c) 间伐对叶片氮磷含量比的影响

(a) Effects of thinning on leaf N　(b) Effects of thinning on leaf P　(c) Effects of thinning on leaf N∶P

图 3　间伐对叶片氮、磷化学计量特征的影响

Fig. 3 Effects of thinning on leaf N and P stoichiometry



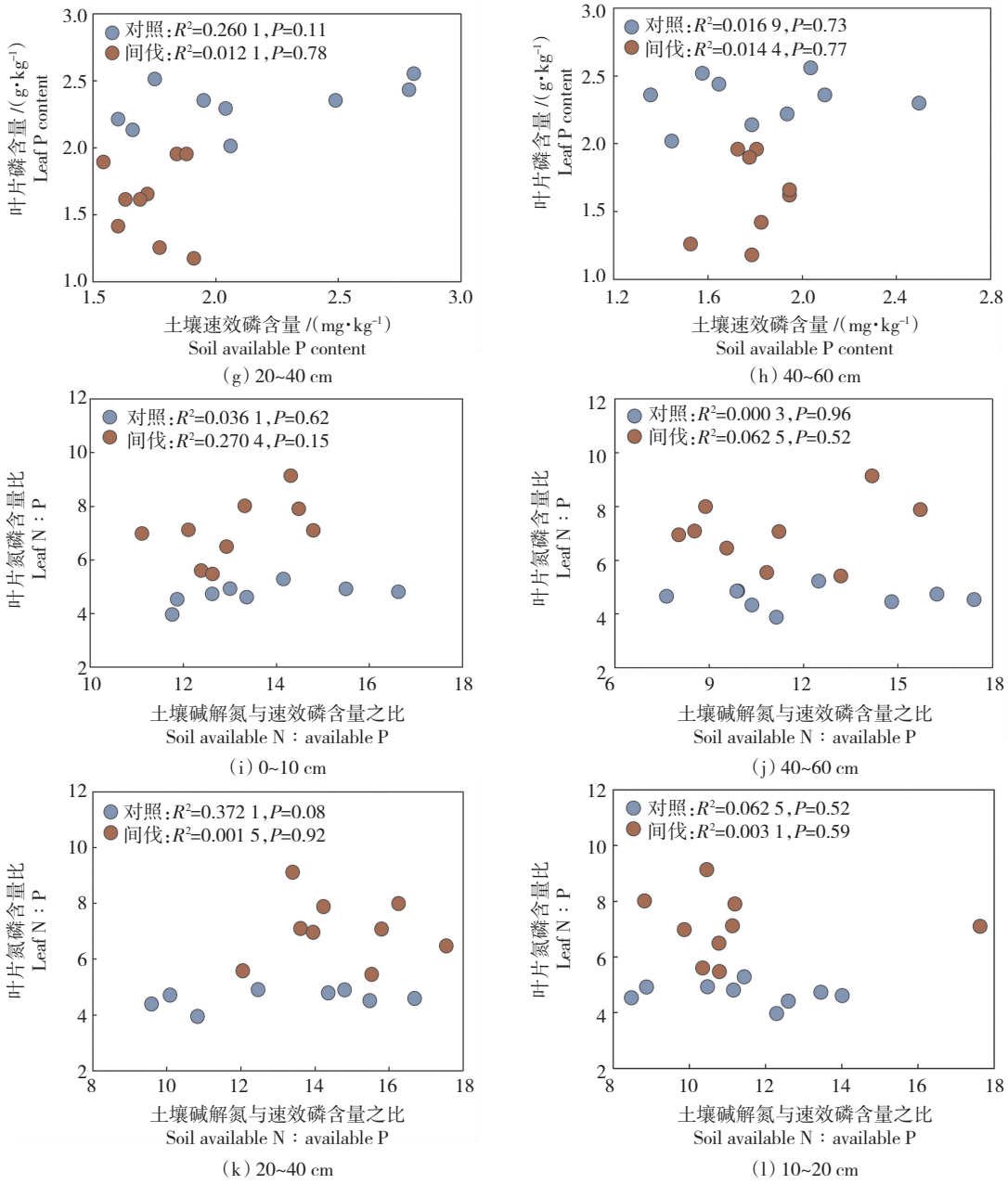


图 4 间伐对叶片与土壤氮磷化学计量特征相关性的影响

Fig. 4 Effect of thinning on the correlation between leaf-soil N and P stoichiometry

含量没有显著相关性;间伐后,马尾松叶片氮含量与 0~60 cm 土层碱解氮含量均无显著相关性。间伐没有改变叶片-土壤的磷化学计量特征相关性,间伐和对照马尾松叶片磷含量与土壤速效磷含量均无显著相关性(P>0.05),如图 4(e)—图 4(h)所示。说明对照和间伐马尾松生长均没有受土壤速效磷含量的限制。间伐对叶片氮磷含量比与土壤氮磷含量比的相关性没有显著影响。对照和间伐各土层叶片氮磷含量比与土壤氮磷含量比均无显著相关性(P>0.05),如图 4(i)—图 4(l)所示。

3 讨论

3.1 高强度间伐改变了马尾松土壤理化性质

研究发现高强度间伐 5 a 后,马尾松林土壤含水量显著降低,这与 Wang 等[15]和 Shen 等[16]的研究发现一致。过去的研究认为这主要是间伐后林地光照增强、土壤温度升高、蒸发量增加导致的[17]。最近的研究发现,高强度间伐还改变了马尾松的水分吸收策略,即从不间伐和低强度间伐的深层土壤水分利用模式转变为高强度间伐后的表层土壤水

分吸收模式,原因与叶片生物量、细根生物量密度和叶片水势等树木性质差异有关。这为本研究中 0~10 cm 土层土壤含水量下降程度最高提供了新的解释(图 1(a))。Li 等[3]的研究发现,秦岭松栎天然混交林土壤含水量虽然在间伐 4 a 后显著降低,但是在间伐 12 a 后又恢复到了对照水平,同时土壤有机碳含量也恢复到了对照水平,类似的结果在落叶松间伐研究中也有报道[18]。由此可见,天然林在间伐后土壤具有自动恢复功能,但是本研究的马尾松林是人工林,其恢复状况还有待继续观察。

高强度间伐显著提高了马尾松林土壤 pH,在不少间伐研究中也有类似报道[19]。这是因为间伐促进林下植被生长,林下植被凋落物和根系分泌物的分解中和了马尾松林地的酸性,从而提高了土壤 pH[20]。前人研究报道的间伐引起土壤 pH 升高主要发生在表层(0~20 cm)土壤,但是本研究发现间伐引起表层和深层(0~60 cm)土壤 pH 均显著升高,说明该强度间伐对深层土壤也有显著影响。

高强度间伐显著降低了马尾松林表层(0~20 cm)土壤 N、P 含量,但是对中层(20~40 cm)和深层(40~60 cm)N、P 含量没有显著影响。这一方面是因为高强度间伐(51%)导致林内初级生产力在短时间内急剧下降,地上和地下凋落物输入显著降低(表 1),土壤养分来源骤减。另一方面是因为间伐后林分、凋落物对雨水截留能力降低,N 等土壤易溶性养分淋溶损失增加,导致 0~20 cm 土层碱解氮含量降低。前人研究发现 20%~40%的间伐强度既能够保证凋落物输入量,又能通过改善林内环境加速凋落物分解和养分释放,对提高土壤养分最合适[20-21]。

3.2　高强度间伐改变马尾松叶片氮磷生态化学计量特性

叶片 N∶P 也被作为评价植物营养状况,判断土壤养分供应能力的重要指标[7]。本研究中,高强度间伐对马尾松叶片 N 含量没有显著影响,但是显著降低了叶片 P 含量,从而导致叶片 N∶P 从 4.65 显著升高至 7.07(图 3)。Koerselman 等[22]提出 N∶P<14、N∶P =14~16、N∶P>16 分别表示植物生长受到 N 限制、N 和 P 共同限制、P 限制。按照这一标准,本研究马尾松林生长在间伐前后均严重受到 N 限制,但是间伐后 N 限制程度有所降低,而 P 不是限制马尾松生长的主要养分元素。

王娜等[23]在三峡库区、魏大平等[24]在四川宜宾开展的研究表明,马尾松叶片 N 含量分别为 15.11 g/kg 和 11.82 g/kg,P 含量分别为 0.60g/kg 和 0.75 g/kg,叶片 N∶P 高达 15~38。本研究对照和间伐马尾松叶片 P 含量(2.23 g/kg 和 1.62 g/kg)均显著高于这 2 个地区,但是 N 含量(10.78 g/kg 和 11.16 g/kg)差异不大。而且本研究马尾松林对照 0~20 cm 土层全 P 含量约为 0.50 g/kg,接近于我国南方红壤全 P 含量(0.56 g/kg)均值,P 含量并没有特别匮乏[25],进一步说明本研究马尾松生长主要受到氮限制。

3.3　高强度间伐改变马尾松叶片-土壤氮相关关系

全球范围内,关于叶片性状和土壤养分之间关系的分析结果表明,叶片性状可能比生长形态更能预测植物对养分供应的适应情况[26]。而且,植物叶片养分化学计量不仅能够反映土壤养分状况变化,还能够反映植物生长对间伐措施短期或长期的适应情况[27]。本研究对照叶片 N 含量与 10~40 cm 土壤碱解氮含量显著正相关(0~30 cm 土层是马尾松根系分布的主要区域),说明马尾松叶片 N 含量受土壤 N 含量影响,也证实了上述马尾松生长受土壤 N 含量限制的推测。但是间伐后马尾松叶片 N 含量与 4 个土层碱解氮含量均无显著相关性。这表明间伐后马尾松叶片 N 含量不受土壤 N 含量限制,同时也说明间伐后土壤 N、P 养分含量的降低在短期内没有对马尾松生长产生限制。

在大部分植物生长受土壤养分限制的生态系统中,叶片养分化学计量特征总体上与土壤呈正相关关系,当土壤养分发生变化时,叶片养分特征会产生相应的变化以保证自身生长、繁殖等需求[28-29]。本研究中,间伐引起马尾松叶片 N 含量不受土壤 N 含量限制的可能原因有 2 个:一个是间伐后保留木数量显著降低,马尾松生长不再受土壤 N 限制;另一个是间伐引起了马尾松的养分利用策略变化。在 N 缺乏典型的沙漠地区,草本利用土壤生物结皮为自身生长提供 N 元素,导致叶片与土壤 N 含量并不显著相关性[30];在土壤 P 匮乏的森林中,植物通过形成磷元素重吸收等紧密型循环策略以满足自身磷需求,从而使植物磷需求与土壤磷供应关系减弱[31]。本研究中,马尾松可能通过提高叶片 N 回收率,降低了其对土壤 N 的依赖。在很多研究中有报道显示,间伐引起植物 N、P 回收率发生变化,进而改变叶片 N∶P。Jiang 等[5]研究发现在 N 限制区域,高强度间伐提高了马尾松的 N 回收率,

降低了 P 回收率,以应对 N 限制。Qiu 等[27]对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)的高强度间伐后也发现了类似的结果。此外,马尾松叶片与土壤 N、P 相关性变化,可能与土壤含水量和 pH 等特性的变化也密切相关,需要进一步开展研究进行深入分析。

4 结论

研究区马尾松生长主要受到 N 限制,而非 P 限制。以大径材培育为目的高强度间伐在短期内引起了马尾松林土壤含水量显著降低,土壤 pH 显著升高,表层土壤 N、P 养分含量显著降低,同时使得叶片 P 含量显著降低,叶片 N∶P 显著提高。但是高强度间伐也使得叶片与土壤 N 化学计量特征的相关性由显著转变为不显著,即马尾松生长不受土壤 N 限制,这可能是马尾松胸径增加的主要原因。

【参 考 文 献】

[1] QIU X, PENG D, WANG H, et al. Minimum data set for evaluation of stand density effects on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantations in North China[J]. Ecological Indicators, 2019, 103: 236-247.

[2] 范少辉,赵建诚,苏文会,等. 不同密度毛竹林土壤质量综合评价[J]. 林业科学,2015,51(10):1-9.
FAN S H, ZHAO J C, SU W H, et al. Comprehensive evaluation of soil quality in*Phyllostachys edulis* stands of different stocking stocking densities[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(10): 1-9.

[3] LI Y, AJLOON F H, WANG X, et al. Temporal effects of thinning on soil organic carbon and carbon cycling-related enzyme activities in oak-pine mixed forests[J]. Forest Ecology and Management, 2023, 545: 121293.

[4] 王有良,宋重升,彭丽鸿,等. 间伐对杉木人工林土壤碳氮及其组分特征的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(5):204-212.
WANG Y L, SONG C S, PENG L H, et al. Effects of thinning on soil carbon and nitrogen fractions in a *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 204-212.

[5] JIANG J, LU Y C, CHEN B B, et al. Nutrient resorption and C: N: P stoichiometry responses of a *Pinus massoniana* plantation to various thinning intensities in southern China[J]. Forests, 2022, 13(10):1699.

[6] GUSEWELL S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. The New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.

[7] ZHANG H, SUN M, WEN Y, et al. The effects of stand age on leaf N∶P cannot be neglected: A global synthesis[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 518: 120294.

[8] DANG P, GAO Y, LIU J L, et al. Effects of thinning intensity on understory vegetation and soil microbial communities of a mature Chinese pine plantation in the Loess Plateau[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 630: 171-180.

[9] 叶钰倩,赵家豪,刘畅,等. 间伐强度对马尾松人工林根际与非根际土壤中性糖特征的影响[J]. 林业科学,2019,55(8):28-35.
YE Y Q, ZHAO J H, LIU C, et al. Impacts of thinning intensity on neutral sugars in rhizosphere and bulk soil of *Pinus massoniana* plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(8): 28-35.

[10] 郭文芳,李鑫,陈艳梅,等. 太行山坡地不同管理措施植被-土壤系统耦合关系[J]. 生态学报,2023,43(15):6170-6181.
GUO W F, LI X, CHEN Y M, et al. Evaluation of the coupling relationship between vegetation and soil system under different management measures in Taihang Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6170-6181.

[11] 方晰,陈金磊,王留芳,等. 亚热带森林土壤磷有效性及其影响因素的研究进展[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(12):1-12.
FANG X, CHEN J L, WANG L F, et al. Research progress on soil phosphorus availability and its influential factors in subtropical forests[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(12): 1-12.

[12] 吴昊旻,王红雷,梁艳. 1980—2010 年丽水市土壤温度变化特征[J]. 气象与环境学报,2013,29(1):68-73.
WU H M, WANG H L, LIANG Y. Character of soil temperature from 1980 to 2010 in Lishui, Zhejiang Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(1): 68-73.

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Scientech Press, 2000.

[14] 何相玉,周冠军,张新洁,等. 氮磷添加对水曲柳人工林叶片、细根和土壤生态化学计量特征的影响[J]. 森林工程,2023,39(1):73-81.
HE X Y, ZHOU G J, ZHANG X J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on stoichiometry characteristics of leaf, fine root and soil of *Fraxinus mandshurica* plantation[J]. Forest Engineering, 2023, 39(1): 73-81.

[15] WANG T, XU Q, ZHANG B, et al. Effects of understory

removal and thinning on water uptake patterns in *Pinus massoniana* Lamb. plantations: Evidence from stable isotope analysis [J]. Forest Ecology and Management, 2022, 503: 119755.

[16] SHEN Y F, CHENG R, XIAO W F, et al. Effects of understory removal and thinning on soil aggregation, and organic carbon distribution in *Pinus massoniana* plantations in the three Gorges Reservoir Area[J]. Ecological Indicators, 2021, 123: 107323.

[17] 朱喜,何志斌,杜军,等.间伐对祁连山青海云杉人工林土壤水分的影响[J].林业科学研究,2015,28(1):55-60.
ZHU X, HE Z B, DU J, et al. Effects of thinning on the soil moisture of the *Picea crassifolia* plantation in Qilian Mountains[J]. Forest Research, 2015, 28(1): 55-60.

[18] 徐庆祥,卫星,王庆成,等.抚育间伐对兴安落叶松天然林生长和土壤理化性质的影响[J].森林工程,2013,29(3):6-9.
XU Q X, WEI X, WANG Q C, et al. Impact of thinning on growth and soil properties of natural *Larix gmelinii* forest[J]. Forest Engineering, 2013, 29(3): 6-9.

[19] TRENTINI C P, CAMPANELLO P I, VILLAGRA M, et al. Thinning partially mitigates the impact of Atlantic forest replacement by pine monocultures on the soil microbiome[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1491.

[20] 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.
YE Y Q, ZHAO J H, LIU C, et al. Effects of thinning on nitrogen contents and enzyme activities of rhizosphere soil in *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(3): 193-198.

[21] 李敏,赵熙州,丁波,等.不同间伐处理对马尾松人工林土壤特性季节动态变化的影响[J].东北林业大学学报,2023,51(5):84-90.
LI M, ZHAO X Z, DING B, et al. Seasonal dynamic response of soil characteristic of *Pinus massoniana* plantation to different thinning treatments[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(5): 84-90.

[22] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. The Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441.

[23] 王娜,程瑞梅,肖文发,等.三峡库区马尾松根和叶片的生态化学计量特征[J].林业科学研究,2016,29(4):536-544.
WANG N, CHENG R M, XIAO W F, et al. Ecological stoichiometric characteristics of root and leaf of *Pinus massoniana* in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Forest Research, 2016, 29(4): 536-544.

[24] 魏大平,张健,张丹桔,等.不同林冠郁闭度马尾松(*Pinus massoniana*)叶片养分再吸收率及其化学计量特征[J].应用与环境生物学报,2017,23(3):560-569.
WEI D P, ZHANG J, ZHANG D J, et al. Leaf carbon, nitrogen, and phosphorus resorption and the stoichiometry in *Pinus massoniana* plantations with various canopy densities[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(3): 560-569.

[25] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. The New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[26] PANG Y, TIAN J, LV X Y, et al. Contrasting dynamics and factor controls in leaf compared with different-diameter fine root litter decomposition in secondary forests in the Qinling Mountains after 5 years of whole-tree harvesting[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 838(Pt 2): 156194.

[27] QIU X, WANG H, PENG D, et al. Thinning drives C: N: P stoichiometry and nutrient resorption in *Larix principis-rupprechtii* plantations in North China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 462: 117984.

[28] 刘莉,蔡锰柯,刘旭军,等.间伐对华北落叶松人工林叶、根及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响[J].东北林业大学学报,2019,47(8):1-7.
LIU L, CAI M K, LIU X J, et al. Effects ofthinning on ecological stoichiometry C, N and P in leaves, roots and soil of *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(8): 1-7.

[29] PIERCE S, NEGREIROS D, CERABOLINI B E L, et al. A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes world-wide[J]. Functional Ecology, 2017, 31(2): 444-457.

[30] 陶冶,张元明.古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征[J].应用生态学报,2015,26(3):659-665.
TAO Y, ZHANG Y M. Leaf and soil stoichiometry of four herbs in the Gurbantunggut Desert, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 659-665.

[31] LANG F, BAUHUS J, FROSSARD E, et al. Phosphorus in forest ecosystems: new insights from an ecosystem nutrition perspective[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2016, 179(2): 129-135.