

兰州市北山典型侧柏人工林分叶片与土壤生态化学计量特征

朱潮¹, 武利玉¹, 张崇庆¹, 魏翻江², 王燕茹¹,
马永林¹, 何媛¹, 杨玉凤¹, 蒋仕敏¹

(1.甘肃农业大学林学院,兰州 730070;2.甘肃省人大机关官山林场,兰州 730070)

摘要: 通过野外调查和室内分析相结合的方法,以兰州市北山仁寿山省人大官山林场选取人工灌溉下造林年限相同、立地条件相似的侧柏×榆树(S1)、侧柏×山毛桃(S2)、侧柏×山杏(S3)、侧柏×刺槐(S4)、侧柏纯林(S5)为研究对象,探讨土壤和叶片生态化学计量特征及相互关系。结果表明:(1)不同林分侧柏叶片 C、N、P 含量均表现为 S4>S3>S2>S1>S5,各混交林的均大于纯林;侧柏叶片 C:N 表现出与 C、N、P 的含量呈现相反的趋势;N:P<14,说明该区域植物生长总体上受 N 元素限制。(2)不同林分土壤 C、N、P 含量均表现为 S4>S3>S2>S1>S5,各混交林的均大于纯林;随土层深度加深而降低,土壤养分“表聚”特征明显;C:N 略高于全国森林土壤的平均水平,C:P 和 N:P 均低于全国平均水平,说明该区土壤对植物生长所需的 N 元素供应不足。(3)相关分析表明,该区域侧柏叶片的 C、N、P 含量变化和土壤 C、N、P 含量变化无显著相关性,表明土壤 C、N、P 供应量对侧柏叶片 C、N、P 含量影响不大。综上所述,兰州市北山侧柏混交林较侧柏纯林具有更好的固碳能力和养分稳定性,该区植被恢复中应合理营造混交林,以促进养分平衡。

关键词: 兰州北山;侧柏人工林;土壤;叶片;生态化学计量

中图分类号:S154.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0361-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.049

Ecological Stoichiometric Characteristics of Leaves and Soil in a Typical *Platycladus orientalis* Plantation in Beishan of Lanzhou City

ZHU Chao¹, WU Liyu¹, ZHANG Chongqing¹, WEI Fanjiang², WANG Yanru¹,
MA Yonglin¹, HE Yuan¹, YANG Yufeng¹, JIANG Shimin¹

(1.College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070;

2.Guanshan Forest Farm of Gansu Provincial People's Congress, Lanzhou 730070)

Abstract: Taking *Platycladus orientalis* × *Ulmus pumila* forest (S1), *P. orientalis* × *Prunus davidiana* forest (S2), *P. orientalis* × *Armeniaca sibirica* forest (S3), *P. orientalis* × *Robinia pseudoacacia* forest (S4) and *P. orientalis* forest (S5), which has same afforestation period and the similar site conditions, in the Guanshan Forest Farm of Renshoushan Province in Beishan of Lanzhou City, as the research object, the ecological stoichiometric characteristics of soil and leaves and their relationship were studied based on field investigation and indoor analysis. The results showed that: (1) The content of C, N and P in the leaves of *P. orientalis* in different forests followed the order of S4>S3>S2>S1>S5, and the values of mixed forest were all larger than those of pure forests. The value of C:N in the *P. orientalis* leaves showed the opposite trend to that of C, N and P content. The value of N:P less than 14 indicated that plant growth in this area was generally restricted by N elements. (2) The content of soil C, N and P in different forest stands all followed the order of S4>S3>S2>S1>S5, and the values of mixed forests were all larger than those of pure forests. The soil nutrients decreased with the increasing of soil depth, and the “surface accumulation” characteristics of soil nutrients were obvious. C:N was slightly higher than the national average level of forest soil, and C:P and N:P were lower than the national average level, indicating that the soil in this

收稿日期:2021-03-20

资助项目:甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA518)

第一作者:朱潮(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事林草植被恢复与重建研究。E-mail:zc.gsau@qq.com

通信作者:武利玉(1968—),女,副教授,硕士生导师,主要从事林业生态、城市林业等方面的研究。E-mail:liyu199738@163.com

region was insufficient in the supply of N for plant growth. (3) Correlation analysis showed that there is no significant correlation between the changes of C, N and P content in *P. orientalis* leaves and the changes of C, N and P content of soil in this area, indicating that the supply of soil C, N and P had little effect on C, N and P content of *P. orientalis* leaves. In conclusion, the *P. orientalis* mixed forest had better carbon sequestration capacity and nutrient stability than pure *P. orientalis* forest in Beishan of Lanzhou City. The mixed forests should be constructed reasonably to promote nutrient balance during vegetation restoration in this area.

Keywords: Lanzhou Beishan; *Platycladus orientalis* plantation; soil; leaf; ecological stoichiometry

生态化学计量(ecological stoichiometry)是研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学,主要研究生态过程中碳(C)、氮(N)、磷(P)化学元素之间的计量关系^[1]。在森林群落中,土壤和植被相互影响,土壤为植物生长提供水分和矿物营养,决定植物个体生长发育及生物量的累积^[2]。反之,植物自身的恢复和退化分解的过程影响土壤养分在时间和空间上的分布变化,植物吸收养分同时以凋落物形式向土壤归还养分,使得土壤和植物不断进行着 C、N、P 转化与累积的循环过程,从而促进陆地植被生态系统的演化与恢复^[3-4]。因此,了解土壤与植物间 C、N、P 养分循环过程的化学计量变化,对于评价人工植被恢复过程中土壤肥力状况和可持续发展具有重要意义。

目前关于植被—土壤生态化学计量的研究多集中在不同类型植被在热带雨林^[5]、沙漠^[6]、黄土高原^[7]以及不同地形^[8]、海拔^[9]和气候条件下的生态化学计量特征^[10]。此外相关研究^[11]表明,针对黄土高原不同林龄的油松林叶片与土壤 C、N 含量均随着林龄增加先增加后降低,但是叶片与土壤 C、N 关系不显著。针对不同演替阶段的云南普洱季风常绿阔叶林的研究发现,植物及土壤 N、P 含量均随着群落演替先减少后增加^[12]。植被恢复过程中,叶片和土壤 C、N、P 含量及增速均发生显著变化,且存在密切的联系。叶片 N、P 受到土壤 N 的显著影响,叶片和土壤 N:P 紧密相关,表明 N:P 可以将植物和土壤联系起来^[13]。兰州南北两山人工林生态系统是兰州市城市生态系统的重要组成部分,对兰州市城市生态环境有着举足轻重的影响。而针对该区域植被—土壤生态化学计量研究仍相对薄弱,以致无法全面了解养分元素间的相互作用和分配差异关系。侧柏(*Platycladus orientalis*)是一种典型针叶优势树种,有很强的生态适应性,在我国北方各地广泛种植,是荒山绿化的主要造林树种,也是兰州 2000 年实施南北两山环境绿化工程以来人工造林最主要的造林树种。基于此,本文以兰州市北山仁寿山省人大官山林场选取人工灌溉下的造林年限相同、立地条件相似的 5 种典型侧柏人工林下土壤与叶片为研究对象,分析

不同林分类型中侧柏叶片和土壤 C、N、P 化学计量的变化特征及相互关系,对兰州市南北两山人工林的合理营造具有重要意义,为深入研究该地区植被恢复过程中土壤肥力和人工林分间的互馈关系及机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在兰州市北山区,该区位于黄土高原、青藏高原和蒙古高原交会地带,地形以黄土丘陵为主,具有黄土高原特征,水土流失严重,植被稀疏,自然环境较差,大部分为以荒山荒坡为主的荒漠化土地。地势北高南低,由西北向东南倾斜,海拔 1 560~2 067 m,坡面角一般在 30°以上。大陆性气候特点明显,年平均气温 9.3 °C,最高气温 30 °C 左右,最低气温 -10 °C 左右,多年平均降水量 250 mm,年蒸发量 1 800 mm,年日照时间 2 600 h,年均风速 2.3 m/s,最大风速 20 m/s,年无霜期 180 天^[14]。该区土壤为黄土母质发育而成的灰钙土,其水分和肥力保持能力极差。植被类型属于典型草原向荒漠草原的过渡类型,主要人工造林乔木树种有侧柏(*Platycladus orientalis*)、榆树(*Ulmus pumila*)、山毛桃(*Prunus davidiana*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、云杉(*Picea asperata*)和圆柏(*Sabina chinensis*)和银杏(*Ginkgo biloba*)等。

1.2 样地设置

在对兰州市南北两山绿化区踏查的基础上,2019 年 9 月在兰州市北山仁寿山甘肃省人大官山林场(103°41'25"—103°41'35"E,36°08'00"—36°08'15"N)选取人工灌溉下造林年限相同、立地条件相似的侧柏×榆树、侧柏×山毛桃、侧柏×山杏、侧柏×刺槐、侧柏纯林 5 种典型林分下叶片与土壤为研究对象,分别用 S1、S2、S3、S4 和 S5 代表,在每一林分类型内均设置 20 m×20 m 标准地 3 个,在每一标准地内测定并记录乔木树种的株数、树高、胸径,同时记录样地内草本层植物物种,样地基本情况见表 1。

1.3 样品采样与测定

在设置的样地内,土壤采用五点取样法收集,去

除地表植物体和凋落物,分 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—100 cm 共 5 层,使用土钻进行取样,相同土层的土壤组成 1 个混合土样,去除土壤中可见植物根系和残体等,带回实验室,在室内避光处自然风干,然后迅速过筛(0.25 mm),充分混合,装袋,保存。叶片采集从每一样地内选取 3 棵长势基本相同的侧

柏植株,在每一植株树冠中部外围东西南北 4 个方位分别剪取长势基本一致的当年生枝条一枝,同样地相同方向枝条装同一袋,装袋保存后,带回实验室用烘箱(DHG-9240A,上海精宏)先在 105 °C 杀青 2 h,然后在 75 °C 下烘干 48 h,将枝叶分离后的叶片碾碎,装袋保存。

表 1 样地基本情况

林分类型	海拔/ m	坡向	平均 株高/m	平均 胸径/m	草本主要 组成物种
S1	1613.9	北偏东	4.4	5.3	鹅绒藤(<i>Cynanchum chinense</i>)、黄花补血草(<i>Limonium aureum</i>)、紫菀(<i>Aster tataricus</i>)
S2	1623.3	北偏东	4.2	4.6	黄花补血草(<i>Limonium aureum</i>)、细叶亚菊(<i>Ajania tenuifolia</i>)、芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)、狗娃花(<i>Heteropappus hispidus</i>)、珍珠猪毛菜(<i>Salsola passerina</i>)
S3	1644.9	北偏东	3.6	4.1	狗娃花(<i>Heteropappus hispidus</i>)、多裂骆驼蓬(<i>Peganum multi-sectum</i>)、黄花补血草(<i>Limonium aureum</i>)、苔草(<i>Carex</i> spp.)
S4	1652.7	北偏东	5.1	5.9	蒙古苕芭(<i>Cymbaria mongolica</i>)、地稍瓜(<i>Cynanchum thesiodes</i>)、鹅绒藤(<i>Cynanchum chinense</i>)、草木犀(<i>Melilotus officinalis</i>)、狗娃花(<i>Heteropappus hispidus</i>)、苔草(<i>Carex</i> spp.)
S5	1625.7	北偏东	4.0	4.3	黄花补血草(<i>Limonium aureum</i>)、中麻黄(<i>Ephedra intermedia</i>)

叶片和土壤有机碳采用重铬酸钾高温—外加热法,全氮用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 高温消解,采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定^[15]。

1.4 数据处理

采用 SPSS(20.0) 软件中的单因素方差分析和 Pearson 相关分析对侧柏叶片及土壤 C、N、P 含量及化学计量比进行综合比较,运用 Excel 2010 和 Origin 2019 软件进行数据整理与图形制作。

2 结果与分析

2.1 不同侧柏人工林叶片 C、N、P 含量及其化学计量比变化特征

由表 2 可知,不同典型侧柏人工林叶片 C、N、P 含

量存在显著差异($P < 0.05$),均表现为 $S_4 > S_3 > S_2 > S_1 > S_5$ 。5 种不同林分类型侧柏叶片 C 的变异系数分别为 3.5%, 3.7%, 3.9%, 3.2%, 3.5%; 叶片 N 的变异系数分别为 11.31%, 11.72%, 9.9%, 8.8%, 8.2%; 叶片 P 的变异系数分别为 4%, 4.8%, 2.6%, 3%, 3.3%。

C : N 表现出与 C、N、P 的含量呈现相反的趋势, C : P 表现为 $S_1 > S_2 > S_5 > S_3 > S_4$, N : P 表现为 $S_4 > S_3 > S_2 > S_1 > S_5$ 。5 种不同林分类型侧柏叶片 C : N 的变异系数分别为 8.6%, 7.7%, 6.6%, 5.2%, 4.7%; 叶片 C : P 的变异系数分别为 1.6%, 1.8%, 1.6%, 2.0%, 1.4%; 叶片 N : P 的变异系数分别为 8.5%, 7.3%, 6.5%, 6.2%, 5.5%。

表 2 不同典型侧柏人工林叶片 C、N、P 含量及其化学计量比

林分类型	有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)	C : N	C : P	N : P
侧柏×榆树	464.03±16.28C	14.23±1.61D	1.24±0.05D	32.89±2.83B	374.74±6.15A	11.47±0.98C
侧柏×山毛桃	465.46±17.07C	14.76±1.73C	1.26±0.06C	31.81±2.45C	369.58±6.77B	11.68±0.85C
侧柏×山杏	470.93±18.53B	16.17±1.60B	1.29±0.05B	29.31±1.92D	366.13±5.93B	12.54±0.81B
侧柏×刺槐	477.80±15.29A	18.78±1.63A	1.35±0.04A	25.52±1.32E	353.92±6.95C	13.88±0.86A
侧柏纯林	448.38±15.65D	10.33±0.85E	1.22±0.04E	43.61±2.07A	368.62±5.11B	8.48±0.47D

注:不同大写字母表示叶片各林分间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同侧柏人工林土壤 C、N、P 含量及其化学计量比变化特征

由表 3 可知,林分类型对有机碳、全氮、全磷、C : N、C : P、N : P 呈极显著影响($P < 0.01$);土层对

有机碳、全氮、全磷、N : P、C : P 呈极显著影响($P < 0.01$),对 C : N 呈显著影响($P < 0.05$);二者交互作用对有机碳、全磷、C : N、C : P、N : P 呈极显著影响($P < 0.01$),对全氮呈显著影响($P < 0.05$)。

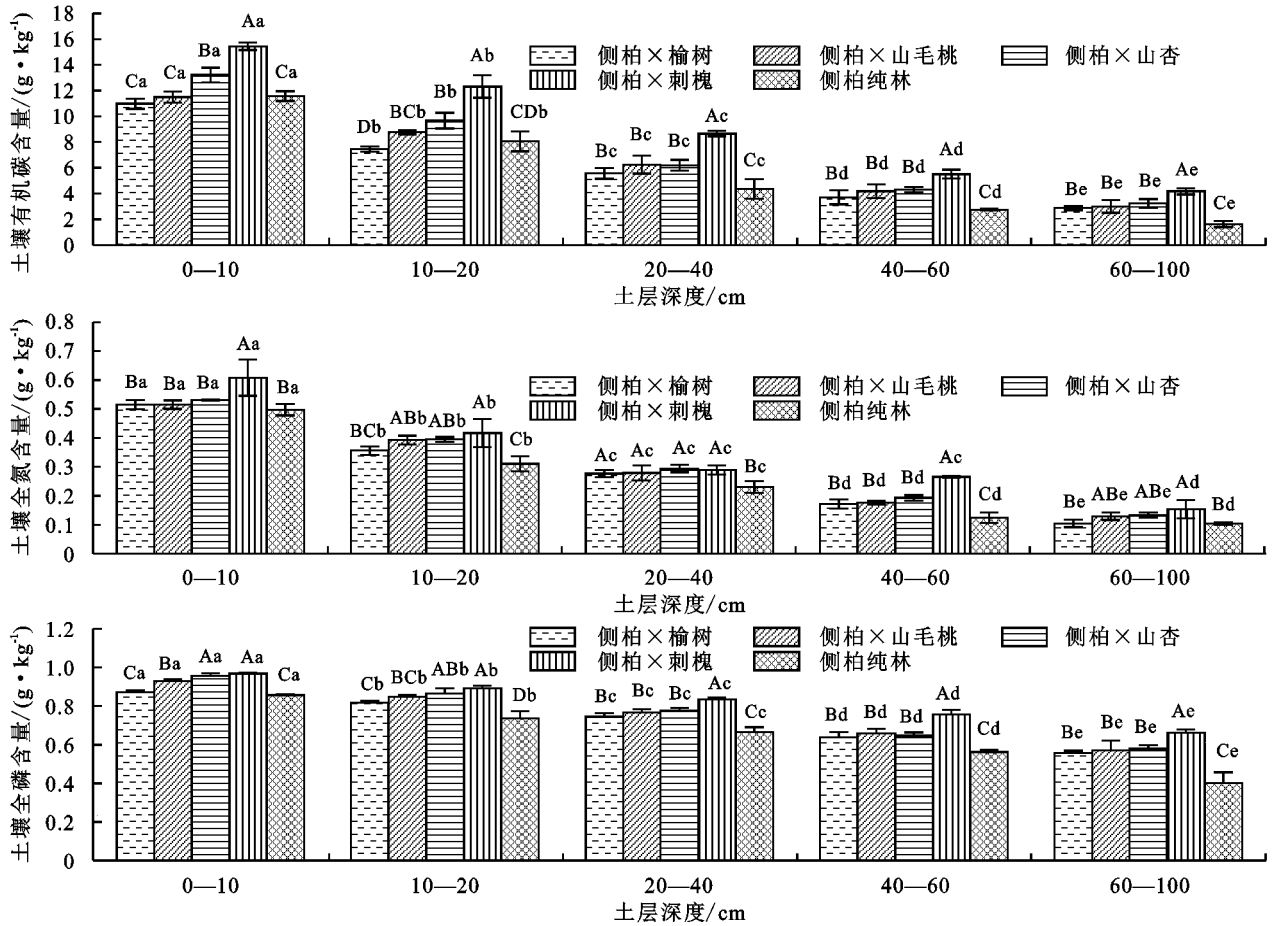
表 3 林分和土层深度对土壤 C : N : P 化学计量比的方差分析

因素	有机碳	全氮	全磷	C : N	C : P	N : P
林分类型	131.99 ^{**}	36.204 ^{**}	119.677 ^{**}	7.113 ^{**}	40.580 ^{**}	4.022 ^{**}
土层	1053.425 ^{**}	808.083 ^{**}	579.496 ^{**}	1.587 [*]	380.301 ^{**}	338.547 ^{**}
林分类型×土层	5.830 ^{**}	2.348 [*]	3.415 ^{**}	2.931 ^{**}	3.246 ^{**}	2.929 ^{**}

注: * 表示 $P < 0.05$ 的显著性; ** 表示 $P < 0.01$ 的显著性。

由图 1 可知,各林分在 0—100 cm 土层土壤 C、N、P 的平均含量均表现为 $S_4 > S_3 > S_2 > S_1 > S_5$ 。侧柏纯林土壤 C、N、P 含量显著低于 4 种侧

柏混交林,在 0—100 cm 土层土壤 C、N、P 的平均含量侧柏×刺槐较侧柏纯林提高 61.50%, 73.07% 和 78.30%。



注:不同大写字母表示相同土层不同林分类型间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示相同林分类型不同土层间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同林分类型土壤不同土层养分含量

5 种不同林分类型土壤有机碳、全氮、全磷均随土层深度加深而显著降低($P < 0.05$),均表现为表层含量最大,有“表聚”现象。侧柏纯林在(0—20 cm)土壤有机碳含量略高于侧柏×榆树,但无显著差异,但在(20—100 cm)5 种林分均显著高于侧柏纯林;侧柏纯林在(0—100 cm)土壤全氮含量均显著低于侧柏混交林;侧柏×刺槐在(0—100 cm)土壤全磷显著高于侧柏纯林,但侧柏混交林较侧柏纯林随土层深度加深而呈现出较缓慢的下降趋势。

由图 2 可以看出,不同林分类型土壤 C : N、C : P、N : P 随土层深度的变化不一致。5 种侧柏人工林土壤 C : N 均随土层深度无明显变化,在 10—20 cm 土

层的 C : N 均最高。S1 土壤 C : N 为 19.38~26.24,均值为 22.05,变异系数 14.15%;S2 土壤 C : N 为 21.44~24.18,均值为 22.49,变异系数 10.18%;S3 土壤 C : N 为 20.37~23.20,均值 22.31,变异系数 8.1%;S4 土壤 C : N 为 21.00~25.10,均值 22.92,变异系数 10.16%;S5 土壤 C : N 为 15.99~25.99,均值 20.01,变异系数 21.84%。土壤 C : N 变异系数的大小为 $S_3 < S_4 < S_2 < S_1 < S_5$ 。

由图 2 还可看出,不同林分类型土壤 C : P 随土层的增加而显著减小,各林分不同土层间土壤 C : P 均存在差异显著。S1 土壤 C : P 为 5.15~12.56,均值为 8.03,变异系数 34.99%;S2 土壤 C : P 为 5.28~12.37,均值为 8.50,变异系数 32.35%;S3 土壤 C : P 为 5.61~13.82,均

值为 9.06, 变异系数 35.14%; S4 土壤 C : P 为 6.31 ~ 15.95, 均值为 10.74, 变异系数 35.94%; S5 土壤 C : P 为 4.06 ~ 13.52, 均值为 7.99, 变异系数 48.19%。土壤 C : P 变异系数的大小为 S2 < S1 < S3 < S4 < S5。

5 种林分类型土壤 N : P 也随土层的增加而减小, 侧柏纯林土壤 N : P 在 40—60, 60—100 cm 土层无显著差异, 5 种不同林分类型表层土壤 N : P 明显大于底层

土壤。S1 土壤 N : P 为 0.19 ~ 0.59, 均值为 0.37, 变异系数 40.54%; S2 土壤 N : P 为 0.23 ~ 0.55, 均值为 0.38, 变异系数 34.21%; S3 土壤 N : P 为 0.23 ~ 0.56, 均值为 0.38, 变异系数 31.59%; S4 土壤 N : P 为 0.23 ~ 0.63, 均值为 0.41, 变异系数 34.15%; S5 土壤 N : P 为 0.22 ~ 0.58, 均值为 0.37, 变异系数 37.84%。土壤 N : P 变异系数的大小为 S3 < S4 < S2 < S5 < S1。

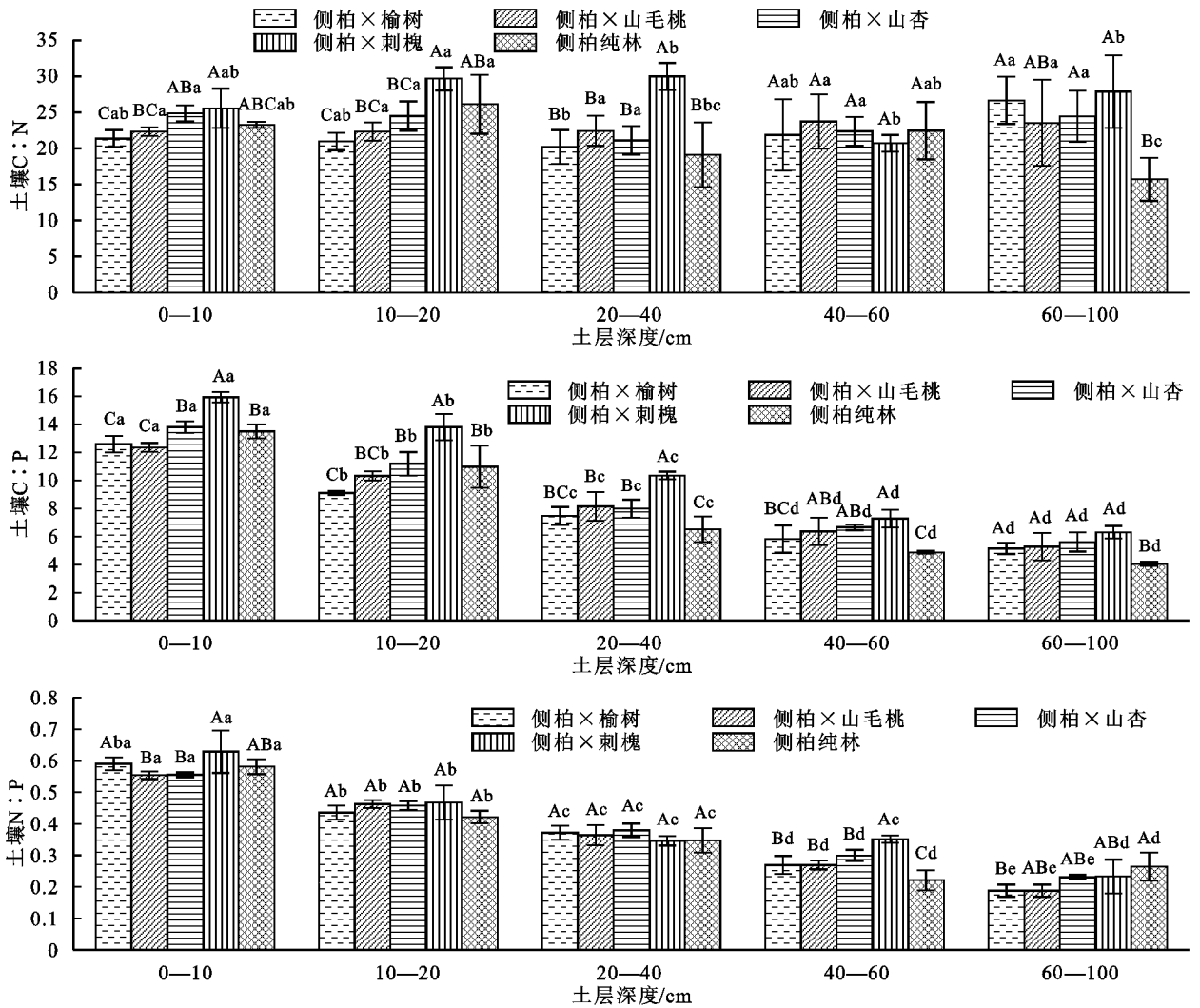


图 2 不同林分类型不同土层土壤养分化学计量比

2.3 不同侧柏人工林叶片和土壤 C、N、P 含量及其比值的相关性分析

从表 4 可以看出, 侧柏叶片 N 与土壤 C : N 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与土壤 N : P 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与土壤 C : P 呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 叶片 C : P 与土壤 C : N 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与土壤 N : P 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同侧柏人工林叶片 C、N、P 含量及其化学计量比变化特征

植物叶片是植物完成光合作用的重要场所。因此, 植物在生长过程中会将大量养分转移到叶片上,

叶片中营养元素的含量和利用效率在植物的生长发育和竞争中起着决定性的作用。

表 4 侧柏人工林叶片与土壤的 C、N、P 含量及化学计量比的相关性

土壤	侧柏叶片					
	C	N	P	C : N	C : P	N : P
C	0.003	0.015	-0.100	0.115	0.103	-0.095
N	0.095	-0.106	-0.079	0.031	0.241	-0.007
P	0.008	0.001	0.095	0.129	0.127	-0.109
C : N	-0.179	0.348**	0.053	0.172	-0.351**	-0.178
C : P	-0.130	0.270*	-0.154	0.096	-0.026	-0.072
N : P	0.229	-0.357**	0.050	-0.078	0.257*	0.083

注: * 表示 $P < 0.05$ 的显著性; ** 表示 $P < 0.01$ 的显著性。

C、N、P 作为植物体中最重要的组成元素之间相互作用,影响植物的各种功能和调节着植物的生长^[16]。本研究中,侧柏纯林叶片 C 含量(448.38 g/kg)低于全球 492 种陆地植物叶片 C 含量(464 g/kg^[17]),但高于我国黄土高原植被叶片 C 含量(438 g/kg^[18]),说明研究区内 5 种不同典型侧柏人工林叶片有机物含量相对于黄土高原植被叶片有机物含量都高。叶片 N 含量显著低于全球(N 20.1 g/kg^[17]),但侧柏×刺槐(18.78 g/kg)略高于全国范围内(N 18.63 g/kg^[19])的含量水平,这可能与针叶树侧柏纯林及其吸收、储存和转化 N 元素的机制有关,也与叶型有关,当降雨基本相同时,降雨的淋洗效果更强,因此侧柏叶片的氮含量普遍低于全球和国家水平^[20]。同时,叶片 P 含量显著低于全球水平(P 1.99 g/kg^[17]),但与我国(P 1.21 g/kg^[19])水平相近,这是因为与世界其他地区相比,我国陆地生态系统缺磷的现象更为明显,而且还与该地区的强烈风化和土壤侵蚀有关^[21]。另外,由于不同生活型的乔木叶片养分含量显著不同,与落叶乔木和阔叶乔木相比,针叶树侧柏的 N、P 含量往往较低^[22]。总体而言,研究对象均为侧柏人工林的情况下,侧柏叶片 C、N、P 含量在 3 地年均降水量基本相近的情况下随研究区域年均气温增大而增大,本研究区年均气温(9.3 °C)小于北京九龙山年均气温(11.8 °C)^[23]和晋西黄土区(10.0 °C)^[20]。“温度—植物生理假说”(PPH)认为,植物在低温下提升自身元素含量来补偿低温的光合速率^[24],符合“温度—植物生理假说”。

此外,在本研究中,侧柏叶片 C : N 表现出与 C、N 和 P 的含量呈现相反的趋势,C : P 表现为 S1 > S2 > S5 > S3 > S4,这是因为不同典型侧柏人工林叶片 C 含量区别不大,而 C : N 和 C : P 在很大程度上取决于 N 和 P 含量的高低。作为植物生长的主要限制因素,N 和 P 在植物中的功能相关,并且 N : P 比率通常用作判断植物生长的指标,判断生态系统是否受到限制。Aerts 等^[25]指出,当叶片 N : P < 14 时,群落水平的植物生长主要受 N 的限制;N : P > 16 时,植物生长主要受 P 限制;当 14 < N : P < 16 时,植物生长受 N 和 P 共同限制。研究区 5 种典型侧柏人工林侧柏叶片 N : P 平均值分别为 11.47, 11.68, 12.54, 13.87 和 8.48,明显小于 14,表明该地区的土壤中植物生长所需的氮元素供应不足。目前,植物中限制性元素的判定大多以叶片为研究对象,这是因为叶片是植物完成光合作用的器官,同时是反映植物生长状况的最敏感的器官。因而,叶片并

不是唯一且最全面的判断标准,仍然需要扩展到其他器官以促进综合判断,这需要在未来的研究中取得新的进展。

3.2 不同侧柏人工林土壤 C、N、P 含量及其化学计量比变化特征

由于森林植被类型的不同,土壤表层凋落物的储量和组成以及乔木根系生长发育和凋落物的分解速率存在一定差异,从而造成不同植被类型林地土壤养分含量的差异^[26]。本研究中,5 种典型侧柏人工林土壤有机碳、全氮、全磷均随土层深度加深而降低,并且表层含量明显高于深层土壤,这说明土壤养分“表聚”特征明显,这与前人^[20]研究结果表现一致。这主要是由于地上部分的枯落物、动物残体等聚集在表层,表层土壤通气状况良好,养分充足,有利于土壤微生物的活动,从而丰富表层土壤有机碳含量。而随着土层深度的增加,枯落物及腐殖质对土壤元素积累影响逐渐减小^[27]。该区不同典型侧柏混交林土壤 C、N、P 含量均明显高于其侧柏纯林,表明混交林地较侧柏纯林具有更积极的养分累积作用,印证了不同森林植被类型在土壤碳和氮元素的积累速率上存在明显差异^[28]。

此外,在 4 种混交林中,侧柏×刺槐土壤有机碳、全氮、全磷含量最高,这可能是因为刺槐生长快,萌蘖力强,生物量大,枯枝落叶回归到土壤中的养分多;也可能因为刺槐是豆科植物有关,根瘤菌固氮能力强,从而提高土壤肥力;其次为侧柏×山杏、侧柏×山毛桃和侧柏×榆树,侧柏纯林最低,这可能是针阔混交林较侧柏纯林地表覆盖着更多的凋落物,林下草本植物多,更有利于维持土壤肥力。另外,由于侧柏是针叶树种,凋落物中单宁等酯溶性物质输入土壤不利于分解及养分释放,导致大量养分滞留于凋落物种^[29],所以侧柏纯林土壤养分含量小于其他林分。土壤化学计量比是反映土壤内部 C、N、P 循环的重要指标,由本文分析结果可知,研究区 5 种典型侧柏人工林中土壤 C : N(22.21~26.77)高于全国森林土壤^[30]平均水平(13.70),C : P(7.99~10.74)和 N : P(0.37~0.41)远小于全国平均水平(C : P 为 44.50, N : P 为 3.20),本研究中土壤 C : N 高于全国森林土壤平均水平,这可能是与土壤 N 元素偏低有关,这与朱秋莲^[31]研究结果一致,较高的 C : N 值表明该地区的土壤限制微生物的活动,导致有机物分解和矿化变慢,不利于表层植物吸收养分^[32]。土壤 C : P 的高低与全磷含量关系密切,本研究区 5 种典型侧柏人工林中土壤 C : P 变化范围均 < 200,说明土壤中的 P 含

量较充足,有利于磷的净矿化作用,提高磷的有效性^[33]。土壤 N:P 可作为氮饱和的重要指标,指示乔木生长发育过程中土壤养分的供给状况,当 N:P <14 时,表现为氮素供应不足^[34]。本研究中土壤 N:P 均 <14,说明该地区的土壤中植物生长所需的氮元素供应不足。土壤 C:P 和 N:P 随着土层深度的增加而减少,该区域 5 种典型侧柏人工林分在不同土层土壤 C:P、N:P 均有一致的变化趋势,表明土壤中有有机碳、全氮、全磷元素由表层向深层递减呈现出一致的变化特征。

3.3 不同侧柏人工林叶片和土壤 C、N、P 含量及其比值的相关性分析

本研究结果显示,兰州北山侧柏叶片的 C、N、P 含量与土壤 C、N、P 含量无显著相关性,也表明土壤 C、N、P 供应量对侧柏叶片 C、N、P 含量影响不大,这可能与兰州市北山地区特殊的土壤环境,以及各林分受到的人为干扰强度不同有关,生长阶段、遗传特性、群落组成和结构等直接或间接地影响着植物化学元素含量^[35],因此土壤与植被之间不存在显著相关性。土壤 C:N、C:P、N:P 与侧柏叶片 N 分别呈极显著正相关、显著正相关和极显著负相关,表明土壤养分含量对植物的生长起重要作用,但对侧柏叶片养分含量影响不大;土壤 C:N、N:P 与侧柏叶片 C:P 分别呈极显著负相关和显著正相关,表明侧柏叶片的有机碳、全磷含量变化与土壤中的有机碳、全磷含量变化有直接联系。

4 结论

(1)侧柏纯林叶片 C 含量低于全球 492 种陆地植物叶片 C 含量,但高于我国黄土高原植被叶片 C 含量;叶片 N 含量显著低于全球,但侧柏×刺槐的略高于全国范围内的 N 含量水平;叶片 P 含量显著低于全球水平,但与我国水平相近。各混交林叶片 C、N、P 含量均大于侧柏纯林,N:P <14,说明该区域植物生长总体上受 N 元素限制。

(2)4 种侧柏混交林较侧柏纯林有效提高土壤 C、N、P 含量,C:N 略高于全国森林土壤的平均水平,C:P 和 N:P 均低于全国平均水平,说明本区域土壤对植物生长所需的 N 元素供应不足。

(3)侧柏叶片的 C、N、P 含量变化和土壤 C、N、P 含量变化无显著相关性,表明土壤 C、N、P 供应量对侧柏叶片 C、N、P 含量影响不大。

(4)侧柏混交林较侧柏纯林具有更好的固碳能力和养分稳定性,研究区应合理增加混交林的营造比例,以促进土壤与植被间的养分平衡。

今后关于兰州市南北两山人工林的研究中,应探索适宜的混交林类型和混交比例,为研究区及半干旱黄土高原区人工植被恢复提供科学依据。

参考文献:

- [1] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere [M]. New York: Princeton University Press, 2002.
- [2] Hejcman M, Cekova M, Schellberg J, et al. Theren gen grassland experiment: Effect of soil chemical properties on biomass production, plant species composition and species richness[J]. Folia Geobotanica, 2010, 45(2): 125-142.
- [3] Vanguelova E I, Nortcliff S, Moffat A J, et al. Morphology, biomass and nutrient status of fine roots of Scots pine (*Pinus sylvestris*) as influenced by seasonal fluctuations in soil moisture and soil solution chemistry [J]. Plant and Soil, 2005, 270(1): 233-247.
- [4] 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.
- [5] 卢同平, 王艳飞, 王黎明, 等. 西双版纳热带雨林土壤与叶片生态化学计量特征的干湿度效应 [J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2333-2343.
- [6] 周晓兵, 陶冶, 张元明. 塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下优势植物化学计量特征 [J]. 草业学报, 2018, 27(5): 15-26.
- [7] 章广琦, 张萍, 陈云明, 等. 黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1328-1336.
- [8] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 247-259.
- [9] 陈晓萍, 郭炳桥, 钟全林, 等. 武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应 [J]. 生态学报, 2018, 38(1): 273-281.
- [10] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 等. 模拟 N 沉降下不同林龄马尾松林凋落叶分解—土壤 C、N 化学计量特征 [J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1147-1158.
- [11] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [12] 张海东, 汝海丽, 焦峰, 等. 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤 C、N、P、K 化学计量学特征 [J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1128-1138.
- [13] 高德新, 张伟, 任成杰, 等. 黄土高原典型植被恢复过程土壤与叶片生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3622-3630.

- [14] 胡想全. 兰州北山国家级人工生态实验区建设的必要性和可行性[J]. 中国水利, 2013(6): 26-28.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Sabine G. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [17] Peter B R, Jacek O. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [18] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 965-973.
- [19] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [20] 李慧, 王百田, 刘涛. 晋西黄土区不同森林树种及其林地土壤养分含量的变化[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(4): 587-595.
- [21] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [22] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C : N : P 化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 48-57.
- [23] 封焕英, 杜满义, 辛学兵, 等. 华北石质山地侧柏人工林 C、N、P 生态化学计量特征的季节变化[J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1572-1582.
- [24] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to T temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [25] Aerts R, Chapin F. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1-67.
- [26] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 134-139.
- [27] Jobbagy E E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [28] 吕文强, 唐金刚, 罗时琴, 等. 4 种植被恢复模式对贵州石漠化地区表层土壤有机碳氮的影响研究[J]. *林业资源管理*, 2016(5): 47-52, 70.
- [29] 李明军, 喻理飞, 杜明凤, 等. 不同林龄杉木人工林植物—凋落叶—土壤 C、N、P 化学计量特征及互作关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7772-7781.
- [30] 吴昊, 邹梦茹, 王思芊, 等. 秦岭松栎林土壤生态化学计量特征及其对海拔梯度的响应[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2323-2331.
- [31] 朱秋莲. 黄土丘陵区不同植被带立地条件对植物—枯落物—土壤生态化学计量特征的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [32] Chapin S F, Matson P, Mooney H A. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*[M]. New York: Springer Verlag, 2002.
- [33] 敖伊敏. 不同围封年限下典型草原土壤生态化学计量特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2012.
- [34] 郭冬艳. 退化草地的生态化学计量学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [35] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 947-954.

(上接第 340 页)

- [21] Rees F, Simonnot M O, Morel J L. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 149-161.
- [22] 曹胜, 周卫军, 罗思颖, 等. 酸碱度调节剂对稻田土壤中有效态镉的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(30): 97-102.
- [23] 赵莎莎, 肖广全, 陈玉成, 等. 不同施用量石灰和生物炭对稻田镉污染钝化的延续效应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 334-340.
- [24] 孙聪, 陈世宝, 宋文恩, 等. 不同品种水稻对土壤中镉的富集特征及敏感性分布(SSD)[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(12): 2384-2394.
- [25] 骆文轩, 宋肖琴, 陈国安, 等. 田间施用石灰和有机肥对水稻吸收镉的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 232-237.