

雷泽勇,刘畅,王国晨,等.沙地樟子松人工林土壤钾素含量研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(5):546-553.
DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250048
LEI Zeyong, LIU Chang, WANG Guochen, et al. The variation of soil potassium content and its influencing factors in plantation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sandy land[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 546-553. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250048

沙地樟子松人工林土壤钾素含量研究

雷泽勇^{1,2,3}, 刘畅¹, 王国晨⁴, 赵国军⁴, 韩艳刚^{1,2}, 王赛男¹, 周凤艳^{1,2*}

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 退化土地生态治理研究院, 辽宁 阜新 123000; 3. 辽宁工程技术大学 阜新振兴发展研究院, 辽宁 阜新 123000; 4. 辽宁省沙地治理与利用研究所, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对植被恢复对沙地土壤钾含量和有效性的影响问题, 采用野外取样和室内测定相结合的方法, 对章古台地区樟子松人工林地不同土层的土壤全钾、速效钾分布特征及其与林分、土壤因子的关系展开研究。研究表明: 樟子松人工林的土壤全钾含量随林龄增长呈不显著上升趋势, 而低密度林分的土壤全钾含量则显著下降; 不同林龄、密度林分间的土壤速效钾含量无显著差异, 且在0~10 cm表层呈现显著富集特性。除冠幅对速效钾变化具有显著影响外, 其他林分因子影响均不显著。在0~20 cm、20~40 cm、80~100 cm土层, 速效钾分别受土壤含水率(SWC)、速效磷、全氮的正向影响。研究结果为沙地樟子松人工林土壤肥力管理提供科学依据。

关键词: 土壤钾素; 樟子松人工林; 林分因子; 土壤理化性质; 沙地

中图分类号: S714.5

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0546-08

The variation of soil potassium content and its influencing factors in plantation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sandy land

LEI Zeyong^{1,2,3}, LIU Chang¹, WANG Guochen⁴, ZHAO Guojun⁴, HAN Yangang^{1,2},
WANG Sainan¹, ZHOU Fengyan^{1,2*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Institute of Degraded Land Ecological Remediation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Fuxin Development Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 4. Liaoning Research Institute of Sandyland Control and Utilization, Fuxin 123000, China)

Abstract: To investigate the effects of vegetation recovery on soil potassium content and availability in sandy land, a combination of field sampling and laboratory analysis was used to study the distribution characteristics of total potassium (TK) and available potassium (AK) in different soil layers of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Zhangguta, as well as their relationships with stand and soil factors. The results showed that soil TK in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations increased slightly with stand age but was not statistically significant, while TK in low-density stands significantly decreased. No significant differences in AK content were observed among stands of different ages and densities, but AK exhibited a pronounced aggregation pattern in the 0-10 cm surface layer. Stand factors, except for crown width, had no significant influence on AK variations. The 0-20 cm, 20-40 cm, and 80-100 cm soil layers were positively affected by soil water content, available phosphorus, and total nitrogen, respectively. The results provide a scientific basis for soil fertility management of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land.

Keywords: soil potassium; *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation; stand factor; soil physicochemical properties; sandy land

收稿日期: 2025-02-13 修回日期: 2025-03-15 接受日期: 2025-04-14 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302505-02); 辽宁省教育厅基本科研项目面上项目(JYTMS20230808)

作者简介: 雷泽勇(1971-), 男, 湖北孝感人, 硕士, 教授, 主要从事荒漠化防治方面的研究。E-mail: zeyonglei@163.com

通信作者: 周凤艳(1969-), 女, 辽宁阜新人, 教授, 主要从事防护林方面的研究。E-mail: fengyanzhou@sohu.com

0 引言

钾(K)是森林生态系统中极为重要的营养元素之一,广泛分布于植物代谢活跃的器官和组织,并承担多重关键角色。作为酶和激素的活化剂,钾催化多种酶的活性,促进植物代谢和光合作用^[1-2];钾通过维持细胞膨压和渗透压来控制水分损失,提升植物抗逆能力^[3-4];钾还参与调节植物体内的离子平衡,促进根系生长和其他营养元素的运输^[5]。此外,钾与土壤中的其他元素相互作用,影响土壤的物理、化学和生物学性质^[6-7],同时也在维持生态系统碳储量、促进土壤有机质矿化及分解等方面发挥重要作用^[8]。当生态系统中可利用钾不足时,植物会出现生长变缓、叶片黄化等问题^[9]。研究表明生态系统中土壤钾含量的变化受多种因素影响,包括生态系统类型、成土母质、土壤性质、气候变化等^[9-11]。不同的森林生态系统,土壤钾含量差异显著。例如,在乌兰布和沙漠东北部沙区的人工林中,二白杨(*Populus gansuensis*)等人工林的钾含量高于对照样地,而新疆杨等林分则较低^[12]。在同一森林生态系统类型中,土壤钾含量通常随林龄增加呈先降低后升高的趋势^[13]。另外,生态系统中含钾矿物数量少^[11]、风化程度低^[14]、淋溶率高^[15]以及植物叶片中钾离子浓度高^[16]等因素,均可导致土壤钾含量降低^[17-19]。土壤性质对土壤钾变化的影响是多方面的,涉及土壤质地^[20]、有机质含量^[12]、pH值^[9]、水分状况^[10]等,较为复杂。尽管钾在森林生态系统中扮演着如此重要的角色,但其受到的关注程度远不及氮(N)和磷(P)^[2,21]。特别是在钾供应潜力较低的科尔沁沙地,土壤钾含量的变化对林分的健康生长和沙地森林生态系统的稳定至关重要^[22]。因此,有必要深入研究科尔沁沙地人工林土壤钾含量的变化规律及其影响因素。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林是科尔沁沙地重要的森林生态系统,在中国北方的沙地治理和生态恢复中发挥着关键作用^[23]。为确保该人工林稳定生长并发挥最大的生态效益,目前已开展了诸多方面的研究,包括人工林生长动态与经营措施^[24]、生物量与营养元素分布^[25]、水分动态变化^[26]、人工促进天然更新技术^[27]、病虫害防治^[28]、气候变化响应^[29],以及土壤理化性质变化等^[30-32]。然而,针对生态系统中重要营养元素钾含量的变化及其影响因素的研究相对匮乏。

基于此,本文以章古台地区不同林龄的樟子松人工林为研究对象,采用野外取样与室内测定相结合的方法,分析林地土壤钾含量的变化特征

及其影响因子,探究不同林龄阶段樟子松人工林土壤钾含量的变化规律,揭示土壤钾含量变化与林分因子及土壤理化性质的关系。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省沙地治理与利用研究所章古台林场(42°39'~42°43'N, 122°23'~122°33'E),平均海拔约225 m,属于中温带大陆性季风气候。近10年平均降水量为483.63 mm,其中6月—8月降水量占全年总量的67.0%;年均蒸发量为1 762 mm。年平均气温为6.1℃,最冷月(1月)平均气温为-12.91℃,最暖月(7月)平均气温为23.58℃;大于等于5℃有效积温2 570℃;全年无霜期为150~160 d。土壤以风沙土为主,林地表层土壤pH值为5.57~6.12^[24]。该地代表性植物有胡枝子(*Lespedeza daurica*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、蕨麻委陵菜(*Potentilla anserina*)和中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*)等^[32]。该地区沙地樟子松人工林建立前,地表植被类型为固定沙地与半固定沙地。

1.2 试验设计、样地设置与土壤样品采集

为研究不同林龄阶段樟子松人工林土壤钾素的变化规律,选取幼龄林、中龄林和近熟林三个林龄阶段作为研究对象。同时,为考察林分密度对土壤钾素的影响,在控制林龄变量的前提下(即选择成熟林阶段),选取平均密度为420 N/hm²的成熟林进行对比。所有样地均设置在辽宁省沙地治理与利用研究所章古台林场的樟子松人工林试验基地内。依据周凤艳等^[32]的标准地选择原则,共设置21块标准地(其中幼龄林5块、中龄林6块、近熟林6块、成熟林4块),每块标准地面积为20 m×20 m。各林分的现有密度由自然死亡或轻微人为干扰形成,具体信息见表1。

表1 沙地樟子松人工林标准地基本信息

Tab.1 basic information of sampling plots of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation

样地编号	林龄/a	林分密度/(N·hm ⁻²)	平均树高/m	胸径/cm
1	13	625	3.33±0.60	7.43±2.15
2	13	975	3.36±0.45	7.17±1.60
3	13	1 175	3.44±0.68	6.67±2.03
4	13	1 425	3.82±0.57	7.36±1.66
5	13	1 625	3.66±0.61	7.27±1.93
6	25	500	7.40±0.96	15.80±2.61
7	27	750	7.55±0.80	14.44±2.85
8	25	1 050	6.69±0.71	12.41±2.39
9	25	1 175	7.80±0.88	13.12±2.26

续表 1

样地编号	林龄/a	林分密度/(N·hm ⁻²)	平均树高/m	胸径/cm
10	27	1 250	10.23±1.54	14.79±2.88
11	25	1 675	6.73±0.91	11.05±2.79
12	42	350	11.44±0.99	22.64±3.05
13	42	750	12.31±1.25	20.19±2.74
14	42	825	10.35±1.12	17.62±3.68
15	42	1 000	10.30±1.10	16.63±2.48
16	42	1 200	10.73±0.93	16.65±2.09
17	42	2 875	10.56±1.20	12.27±2.27
18	56	300	12.43±1.30	23.67±3.78
19	56	400	12.91±1.33	22.23±2.57
20	56	450	13.38±1.23	21.80±2.84
21	56	525	12.27±1.00	20.48±3.53

在设置的标准地内进行林分调查,测定平均胸径、平均树高和平均冠幅,并据此选定标准木。在每株选定的标准木附近(距离树干1 m处),挖掘长、宽、深各1 m的土壤剖面。使用200 cm³环刀在土层剖面0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm深度处采集原状土样,每层重复3次。采集的土样立即装入密封袋密封,带回实验室用于测定土壤容重和土壤含水量。同时,在每个标准地内随机选取5个样点,分别在土层剖面0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm深度采集混合土样。土钻采集的样品带回实验室风干,经剔除石块和植物残体、过筛后,保存于密封袋中,用于测定土壤理化性质。

1.3 林分因子测定

对选定的标准地进行调查测定,计算平均胸径、平均树高和相对植距(relative spacing, RS)。其中,树高使用精度为0.1 m的红外线测树仪(快特能RD1000,美国产)测量;树木胸径使用胸径尺测定;东西冠幅和南北冠幅使用卷尺测量。通过查阅造林单位的造林记录确定林分的年龄。

1.4 土壤理化因子测定方法

采用烘干法测定土壤容重及土壤含水率。采用筛分法结合激光粒度分析仪(LA-300 HORIBA)

测定土壤颗粒组成。分别采用重铬酸钾容量法-外加热法、水浸提-重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳含量、土壤可溶性碳含量。采用半微量开氏法测定土壤全氮含量,采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量,采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量,采用NaHCO₃法测定土壤速效磷含量,采用NaOH熔融-火焰光度测定土壤全钾含量,采用NH₄OAc浸提-火焰光度法测定土壤速效钾含量,采用电位法测定土壤pH值。各土壤因子值的测定和计算方法见文献[33]。

1.5 数据处理与统计分析

使用SPSS 20.0软件对收集到的数据进行统计分析。在分析过程中,采用单因子方差分析和最小二乘法多重比较,检验不同林龄林分及不同土壤层次间全钾和速效钾含量的差异显著性。设定显著性水平 $\alpha=0.05$ 以及极显著性水平 $\alpha=0.01$ 。经检验,所有林分因子和土壤因子数据均符合正态分布,故进一步计算各因子间的Pearson相关系数并检验其显著性。对于与全钾或速效钾存在显著相关关系($P<0.05$)的林分因子和土壤因子,进行标准化(量纲归一化)处理^[34]。随后,分别建立全钾和速效钾的多元线性回归模型。建模过程中,首先采用逐步回归分析筛选影响各土层全钾或速效钾的关键因子,并在共线性诊断中剔除方差膨胀因子(VIF)小于5的因子。最后,基于筛选出的关键因子,利用层次分析法(AHP)评估各因子对全钾或速效钾的相对重要性权重。

2 实验结果

2.1 樟子松人工林土壤全钾含量变化

由表2可知,沙地樟子松人工林全钾含量总体介于(13.83±0.84) g/kg~(21.21±1.08) g/kg之间。在0~60 cm土层中,全钾含量随着林龄增长呈上升趋势,但不显著($P>0.05$),而小密度的成熟林显著低于其他林分($P<0.05$)。

表2 不同生长阶段樟子松人工林地土壤全钾含量差异显著性

Tab.2 significant differences in soil total potassium content in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations at different growth stages

土壤层次/cm	幼龄林/(g·kg ⁻¹)	中龄林/(g·kg ⁻¹)	近熟林/(g·kg ⁻¹)	成熟林/(g·kg ⁻¹)
0~10	18.61±1.00Aa	20.58±0.85Aa	21.21±1.08Aa	13.83±0.84Ba
10~20	18.96±0.60Aa	19.93±0.64Aa	20.55±0.96Aa	15.68±1.17Ba
20~40	19.02±0.32ABa	22.19±1.76Aa	20.89±1.09Aa	16.07±0.34Ba
40~60	19.56±0.42Aa	19.42±1.08Aa	20.55±1.06Aa	15.78±0.45Ba
60~80	17.97±0.37Bab	23.19±1.76Aa	20.45±1.27ABa	15.99±0.73Ba
80~100	16.35±0.62BCb	23.25±1.40Aa	20.07±1.20ABa	14.46±1.23Ca

注:不同小写字母表示同一林龄不同土层之间的差异显著性,不同大写字母表示同一土层不同林龄之间的差异显著性($P<0.05$)。

2.2 樟子松人工林土壤速效钾含量变化

不同生长阶段樟子松人工林地土壤速效钾含量差异显著性见表3。可知,沙地樟子松人工林的速效钾含量为(22.19±1.80) mg/kg~(48.29±8.51) mg/kg,且相同土层深度下,不同林龄林分间的速效钾含量无显著差异。然而,速效钾含量呈现明显的表层富集特征:0~10 cm土层的速效钾含量均显著

高于20 cm以下各土层 ($P<0.05$)。在20 cm以下的深层土壤中,不同林分间以及各土层之间的速效钾含量均无显著差异,表明深层土壤的速效钾含量无明显垂直分异。速效钾占全钾的比例随土层加深而降低,由表层至深层依次为:0.24%、0.18%、0.14%、0.13%、0.13%、0.13%。表层的速效钾占比显著高于深层。

表3 不同生长阶段樟子松人工林地土壤速效钾含量差异显著性

Tab.3 significant differences in soil available potassium content in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations at different growth stages

土壤层次/cm	幼龄林/(mg·kg ⁻¹)	中龄林/(mg·kg ⁻¹)	近熟林/(mg·kg ⁻¹)	成熟林/(mg·kg ⁻¹)
0~10	38.57±2.41Aa	43.47±4.23Aa	38.73±1.47Aa	48.29±8.51Aa
10~20	32.81±3.34Aab	32.86±3.55Ab	31.69±3.61Ab	34.34±6.42Aab
20~40	25.7±1.82Abc	27.86±2.91Ab	27.55±1.45Ab	26.77±3.25Ab
40~60	25.39±1.99Abc	24.16±2.17Ab	25.51±1.02Ab	24.4±3.9Ab
60~80	25.68±1.72Abc	23.95±2.17Ab	25.34±1.15Ab	23.09±1.81Ab
80~100	24.04±0.59Ac	24.1±1.49Ab	26.07±1.7Ab	22.19±1.80Ab

注:小写字母表示同一林龄不同土层之间的差异显著性,大写字母表示同一土层不同林龄之间的差异显著性($P<0.05$)。

2.3 土壤钾素变化的影响因子

全钾与林分因子的相关性不显著(未列出),速效钾仅与东西冠幅最大值显著正相关。然而,

全钾和速效钾含量均与部分土壤因子存在显著相关性,且影响其变化的关键因子随土层加深而变化,见表4、表5。

表4 土壤各土层全钾含量变化的影响因子回归分析及因子的相对重要性

Tab.4 regression analysis of influencing factors and relative importance of total potassium content in each soil layer

土层/cm	预测变量	系数估计值	标准误差	<i>T</i>	<i>P</i>	VIF	<i>R</i> ²	相对贡献率/%
0~10	TK40~60	0.936	0.168	5.565	0	1.971	0.863	53.31
	TK20~40	0.333	0.124	2.678	0.016	1.882		40.47
10~20	TK40~60	0.704	0.106	6.614	0	1.025	0.791	71.11
	AN0~10	-0.427	0.111	-3.862	0.001	1.025		28.89
20~40	TK60~80	0.697	0.125	5.565	0	1.000	0.620	100.00
40~60	TK0~10	0.648	0.076	8.495	0	1.022	0.818	83.74
	TN80~100	16.047	3.835	4.185	0.001	1.022		16.26
60~80	TK80~100	0.693	0.068	10.171	0	1.398		67.78
	TK40~60	0.459	0.112	4.097	0.001	1.399		30.43

注:TK为土壤全钾、TN为土壤全氮、AN为土壤速效氮;TK40~60代表40~60 cm土层全钾,土层标识格式类同;相对贡献率小于10%的未列入。

表5 土壤各土层速效钾含量变化的影响因子回归分析及因子的相对重要性

Tab.5 regression analysis of influencing factors and relative importance of available potassium content in each soil layer

土层/cm	预测变量	系数估计值	标准误差	<i>T</i>	<i>P</i>	VIF	<i>R</i> ²	相对贡献率/%
0~10	AK10~20	0.602	0.059	10.276	0.000	1.628	0.978	45.900
	SOC80~100	2.138	0.186	11.498	0.000	2.217		23.520
	SWC0~20	66.355	23.043	2.880	0.013	1.565		11.964
10~20	AK0~10	0.664	0.095	7.024	0.000	1.101	0.827	71.166
	SWC10~20	165.100	62.470	2.643	0.017	1.122		21.421
20~40	AK10~20	0.458	0.063	7.244	0.000	1.010	0.807	72.758
	CWEWmax	1.442	0.481	3.000	0.008	1.003		14.562
	AP20~40	9.611	2.941	3.268	0.005	1.008		12.680
40~60	AK60~80	1.094	0.119	9.159	0.000	1.000	0.815	100.000
60~80	SWC20~40	101.272	44.692	2.266	0.035	1.000	0.213	100.000
80~100	AK60~80	0.669	0.071	9.479	0.000	1.384	0.936	84.640
	TN80~100	22.011	4.475	4.918	0.000	1.732		11.446

注:AK为土壤速效钾;SOC为土壤有机碳;SWC为土壤含水率;CWEWmax为东西冠幅的最大值;AP为速效磷;TN为速效氮;相对贡献率小于10%的未列入。

从相对贡献率来看(小于10%的因子未列入,下同),对全钾的影响,0~10 cm层主要受20~60 cm层的全钾含量影响;10~20 cm层主要受40~60 cm层的全钾含量和0~10 cm层的土壤速效氮的影响;20~40 cm层仅受60~80 cm层的全钾含量的影响;40~60 cm层除受0~10 cm层全钾含量的影响外,还受80~100 cm层土壤全氮含量的影响;60~80 cm层则受40~60 cm、80~100 cm层的全钾的影响。值得注意的是,40~60 cm层全钾含量主要受0~10 cm层全钾的驱动(相对贡献83.74%),其余土层则主要受更深土层(60~80 cm或80~100 cm)全钾含量的支配。

速效钾的变化受到的影响较为复杂。从相对贡献率来看,除了60~80 cm层仅受20~40 cm层土壤含水率影响外,其他土层速效钾的变化更多受到相邻土层速效钾含量的影响。具体来说,0~10 cm、40~60 cm层主要受下方土层速效钾的影响,而10~20 cm、20~40 cm、80~100 cm层受到的影响更多地来自上方土层的速效钾。此外,0~10 cm层还主要受到80~100 cm层土壤有机碳和0~20 cm层土壤含水率的影响;10~20 cm层还主要受土壤含水率的影响;20~40 cm层受速效磷和东西冠幅最大值的影响,二者的相对贡献率分别为12.68%和14.56%;80~100 cm层还受全氮的影响。

3 分析与讨论

3.1 樟子松人工林对土壤钾素变化的影响

土壤钾含量受成土母质、植被类型等多种因素影响,这些因素在不同地区存在显著差异,导致土壤钾含量呈明显的空间异质性^[35]。研究表明,在沙地樟子松人工林中,土壤全钾含量随林龄增长而升高,但低密度成熟林的全钾含量随林龄的增长而降低。这是由于科尔沁沙地森林土壤的全钾最初来源于成土母质^[22],随着林分生长,凋落物分解成为全钾的重要补充来源^[36]。该地区成土母质主要由硅酸盐矿物组成,具有硅氧四面体骨架结构,其中石英为主要成分,次要成分为长石,并含有少量白云母,2:1型黏土矿物含量极低^[22]。从矿物学特征来看,石英化学性质稳定,基本不参与离子交换,风化过程中几乎不释放钾素;长石类矿物(包括正长石和斜长石)是研究区土壤全钾的主要来源,而含量较低的白云母风化也提供了少量全钾^[37]。研究区土壤全钾的消耗途径主要包括:①林分生长吸收,作为酶和激素活化剂的

钾元素通过根系大量被植物吸收,参与代谢和光合作用,导致土壤全钾含量逐渐降低^[38-39];②降雨淋溶损失^[22,40]。因此,土壤全钾含量的动态变化取决于长石和白云母矿物风化释放量与凋落物分解的归还量之和,减去植物吸收量和降雨淋失量后的净值。当净值为正时,表明钾素输入大于输出,土壤全钾含量增加;当净值为负时,表明土壤全钾含量减少。

沙地樟子松从幼林到近熟林阶段,0~60 cm土层的全钾含量未发生显著变化,见表2。表明在此生长阶段,林分生长吸收及降雨淋溶损失的钾量与长石、白云母矿物风化释放及凋落物分解的归还量基本保持平衡。随着林分生长,根系对钾离子的吸收量增加,在根际区域形成由低到高的钾浓度梯度,促使土壤中的钾呈现自上而下递减的分布格局,进而导致下层钾逐渐向上迁移。这一过程降低了土壤全钾含量。同时,林木生长导致的林分郁闭度增加和凋落物层增厚,通过降低地表光照强度、减少降水渗透,共同抑制矿物的风化作用,削弱土壤全钾的供应量^[13,24]。此外,林龄增长还导致土壤表层pH值降低,进一步减少土壤钾含量。然而,随着林龄增长,凋落物分解归还的钾量增加,林冠和凋落物层对降水的截留作用减轻了钾的淋失^[22]。在这些相互制约的因素共同作用下,沙地樟子松人工林的土壤全钾含量总体上维持动态平衡状态。

当林分进入低密度成过熟阶段后,土壤全钾含量显著下降。产生这一现象的原因为:低密度的成过熟期的樟子松人工林林分稀疏,见表1。由于林分郁闭度降低,截留降雨的作用减弱,加大了土壤中的钾素的淋溶损失^[40-41]。此外,稀疏林分产生的凋落物量减少,通过凋落物分解归还的钾素相应降低。同时,叶片中的钾素在穿透雨作用下发生更强烈的淋溶,进一步减少了回归土壤的钾量^[42]。综上,适度密度的林分生长有助于维持土壤全钾含量的稳定,而过度稀疏的林分则会导致土壤全钾含量显著降低。

沙地樟子松人工林各林龄阶段的土壤速效钾含量虽无显著差异,但均呈现显著的表聚现象,这一特征与不同地区人工林研究结论^[13,22,43-45]一致。速效钾作为植物吸收利用的主要钾形态,其来源包括成土母质中白云母的缓慢风化^[46]、矿物钾的水解释放^[22]、凋落物分解释放^[36],以及穿透雨对叶片及凋落物的淋溶作用^[42],而损失途径主要表现为根系吸收和降雨引发的径流与淋溶^[40]。植物根系通过质流和扩散作用驱动 K^+ 从远端土层向根际迁移^[10],

由于樟子松根系集中分布于0~50 cm土层,尤其在表层相对集中^[47],且穿透雨淋溶和凋落物分解的钾素优先进入表层土壤^[42],表层速效钾含量显著高于深层。尽管沙地土壤的高渗透性使各林龄速效钾均维持在较低水平^[22],但樟子松凭借广布的根系网络、发达的细根系统及巨大的吸收面积^[47],展现出高效的钾素利用能力,因此樟子松在低钾环境下仍能正常生长。

3.2 樟子松人工林土壤钾素含量变化与土壤因子关系

沙地樟子松人工林土壤钾素特征表现出显著的区域特异性:全钾含量与林分因子无相关性,而速效钾仅与东西向冠幅最大值呈显著正相关(见表5)。这一特征既不同于南方毛竹林^[34]、马尾松林^[41]和杉木林^[43],也区别于北方油松林^[13]及塞罕坝地区华北落叶松和樟子松人工林^[39]。研究区土壤全钾含量相对丰富,其动态主要受控于成土母质特性、含钾矿物含量及降雨淋溶等自然因素^[35];林分生长虽对全钾直接影响有限,但通过增加郁闭度和凋落物覆盖可减少降雨淋失,这解释了稀疏成熟林全钾含量显著偏低的现象。同时,速效钾与东西冠幅最大值的正向相关性表明,林分生长促进的冠幅扩展可通过增强降雨截留和凋落物输入提升土壤速效钾含量,这种独特的钾素循环机制可能是沙地樟子松适应贫瘠生境的重要策略。

研究发现,沙地樟子松人工林土壤钾素含量与特定土壤因子呈现显著相关性。各土层钾含量主要受相邻土层钾含量的影响,表明虽然沙地土壤细颗粒含量较低^[31],但钾元素在垂直方向上仍存在活跃的双向迁移:一方面受蒸腾作用及浅层根系分布驱动^[47],水溶性钾、交换性钾及部分缓效钾通过质流-扩散作用从深层向浅层迁移;另一方面,在降雨过程中,叶片淋洗和凋落物分解释放的钾离子通过穿透雨从表层向深层淋溶^[42]。这两个逆向过程形成的动态平衡,最终决定了各土层钾含量的空间分异格局。

速效钾的变化除受到相邻土层速效钾的影响外,还受其他因素的影响。首先,土壤含水率影响土壤中钾的垂直迁移和分布。相邻土层中的钾离子通过质流和扩散作用影响根系层钾素的供给,这与占丽平等^[10]的研究结论一致。由表5可知,0~10 cm层和10~20 cm层的速效钾变化主要受到下方土层速效钾含量的影响,而20~40 cm层则更多受到上方土层速效钾的影响。表明土壤含水率的变化影响钾的溶解度和迁移能力^[22]。其次,土壤有机碳的含量对0~10 cm层的速效钾也有显著正

向影响。这是由于林分的生长使土壤有机碳增加,提升了土壤钾素吸附、保持和释放的能力^[12,30]。再次,土壤的黏粒含量,在一定程度上影响速效钾的变化,但贡献较小。研究表明,黏粒颗粒土壤具有吸附和保留钾离子的能力^[20],因此0~10 cm层黏粒含量越高,淋失到深层的钾离子越低。相反,深层的黏粒越高,吸附和保留钾离子越多,当根系需要钾离子供应的时候,深层的钾离子便能通过质流和扩散的方式迁移到根系层^[31,39]。另外,土壤中的碳氮比和pH值等化学性质可能通过影响微生物活动和养分循环间接影响速效钾的动态^[9]。最后,土壤养分,如土壤全磷、土壤速效磷和土壤全氮、土壤速效氮也在不同土层中对速效钾的变化产生一定的影响,尤其是在20~40 cm的根系层的磷、钾协同促进和80~100 cm深层的氮、钾协同促进。由于磷酸根离子能够与土壤中的铝、铁等离子发生反应,形成可溶性磷酸盐,降低了土壤中铝、铁离子的浓度,减少铝、铁离子对钾的依附,使钾更容易被林木吸收利用^[32]。而氮的增加,会置换出部分被土壤固定的钾离子,使其进入土壤溶液,从而提高了钾的有效性。这些养分之间的相互作用和平衡对植物生长和土壤肥力至关重要,它们可能通过影响植物对钾的吸收和利用效率来影响土壤速效钾的动态^[13]。而林分因子中的东西冠幅和南北冠幅等指标也对某些土层中的速效钾变化有影响,尽管它们的相对贡献较小。这些指标可能反映了根系的分布方位和土壤水分状况,从而对钾素的动态产生一定的影响^[44]。

总之,速效钾的变化是多因素共同作用的结果,涉及土壤含水率、土壤有机碳含量、土壤物理性质、化学性质以及土壤养分状态等多个方面。这些因子通过不同的途径和机制相互作用,共同决定了土壤中钾的动态和有效性。因此,为了有效管理和提高沙地樟子松人工林的土壤肥力,需要综合考虑这些土壤因子,并采取相应的土壤管理措施。

4 结论

(1) 沙地樟子松人工林的生长对土壤全钾和速效钾含量的稳定起到了促进作用,林分稀疏会因降雨淋失导致樟子松人工林钾含量显著下降。

(2) 沙地樟子松各林龄人工林土壤速效钾含量无显著差异,但均表现出了0~10 cm的表层集聚特性。

(3) 速效钾受土壤含水率、有机碳及多养分协同控制;林分因子仅东西冠幅最大值与速效钾显著正相关,其余指标对钾含量无显著影响。

维持合理林分密度并同步优化相关的土壤理化性质是提升沙地樟子松人工林钾储量和有效性的核心策略。

参考文献(References):

- [1] TRÄNKNER M, TAVAKOL E, JÁKLI B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection[J]. *Physiologia Plantarum*, 2018, 163(3): 414-431.
- [2] URBINA I, GRAU O, SARDANS J, et al. High foliar K and P resorption efficiencies in old-growth tropical forests growing on nutrient-poor soils[J]. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(13): 8969-8982.
- [3] ANDRÉS Z, PÉREZ-HORMAECHE J, LEIDI E O, et al. Control of vacuolar dynamics and regulation of stomatal aperture by tonoplast potassium uptake[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(17): E1806-E1814.
- [4] BATTIE-LACLAU P, LACLAU J P, BERI C, et al. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2014, 37(1): 70-81.
- [5] GARCIA K, ZIMMERMANN S D. The role of mycorrhizal associations in plant potassium nutrition[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 337.
- [6] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26(6): 907-913.
CONG Rihuan, LI Xiaokun, LU Jianwei. Advances in research on influence factors of soil potassium transformation[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(6): 907-913.
- [7] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 1-10.
XUE Xinxin, WU Xiaoping, WANG Wenbin, et al. Progress of potassium, magnesium and their interaction in plant-soil system[J]. *Soils*, 2019, 51(1): 1-10.
- [8] EPRON D, LACLAU J P, ALMEIDA J C R, et al. Do changes in carbon allocation account for the growth response to potassium and sodium applications in tropical *Eucalyptus* plantations? [J]. *Tree Physiology*, 2012, 32(6): 667-679.
- [9] CHEN B Z, FANG J C, PIAO S L, et al. A meta-analysis highlights globally widespread potassium limitation in terrestrial ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2024, 241(1): 154-165.
- [10] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2012, 44(4): 548-553.
ZHAN Liping, LI Xiaokun, LU Jianwei, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement[J]. *Soils*, 2012, 44(4): 548-553.
- [11] YOU W H, YIN J Q, LIANG C, et al. Integration of machine learning and VIRS for soil potassium content prediction[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2025, 56(13): 1995-2010.
- [12] 赵志强, 包耀贤, 廖超英, 等. 乌兰布和沙漠东北部沙区人工林土壤钾素特征研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 176-180, 185.
ZHAO Zhiqiang, BAO Yaolian, LIAO Chaoying, et al. Soil potassium characteristics on planted forest in the northeast sandy area of ulanbuh desert[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 176-180, 185.
- [13] 邱新彩, 彭道黎, 李伟丽, 等. 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(2): 221-229.
QIU Xincui, PENG Daoli, LI Weili, et al. Soil physicochemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantations of different ages in Yanqing, Beijing[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, 24(2): 221-229.
- [14] AERTS R, CHAPIN III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*. Elsevier, 1999: 1-67.
- [15] HUSTON M A. Precipitation, soils, NPP, and biodiversity: resurrection of albrecht's curve[J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(3): 277-296.
- [16] LI X, HE N P, XU L, et al. Spatial variation in leaf potassium concentrations and its role in plant adaptation strategies[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108063.
- [17] BARIBAULT T W, KOBE R K, FINLEY A O. Tropical tree growth is correlated with soil phosphorus, potassium, and calcium, though not for legumes[J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(2): 189-203.
- [18] SCHLESINGER W H. Some thoughts on the biogeochemical cycling of potassium in terrestrial ecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 2021, 154(2): 427-432.
- [19] CORNUT I, LE MAIRE G, LACLAU J P, et al. Potassium limitation of wood productivity: a review of elementary processes and ways forward to modelling illustrated by *eucalyptus* plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 494: 119275.
- [20] 熊明彪, 雷孝章, 田应兵, 等. 钾离子在土壤中吸附和解吸动力学研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 115-118.
XIONG Mingbiao, LEI Xiaozhang, TIAN Yingbing, et al. Research progress of K⁺ adsorbing-desorbing kinetics in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(1): 115-118.
- [21] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [22] 曹怡立, 吕刚, 张学利, 等. 不同土地利用方式土壤的钾素形态及有效性: 以科尔沁沙地南缘为例[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(1): 122-130.
CAO Yili, LYU Gang, ZHANG Xueli, et al. Soil potassium forms and availability under different land use patterns: taking the southern margin of Horqin Sandy Land as an example[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(1): 122-130.
- [23] 朱教君, 许美玲, 康宏樟, 等. 温度、pH及干旱胁迫对沙地樟子松外生菌根菌生长影响[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1375-1379.
ZHU Jiaojun, XU Meiling, KANG Hongzhang, et al. Effects of temperature, pH and drought stresses on ectomycorrhizal fungi growth in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1375-1379.
- [24] 雷泽勇, 白津宁, 周凤艳, 等. 辽宁章古台地区不同年龄樟子松固沙林对土壤pH值的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3264-3272.
LEI Zeyong, BAI Jinning, ZHOU Fengyan, et al. Effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand-fixation plantations with different ages on soil pH in Zhanggutai, Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11): 3264-3272.
- [25] 焦树仁. 辽宁章古台樟子松人工林的生物量与营养元素分布的初步研究[J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1985, 9(4): 257-265.
JIAO Shuren. A preliminary study of the biomass and nutrient elements distribution in cultivated Mongolian pine forests in the Zhanggutai region, Liaoning province[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1985, 9(4): 257-265.
- [26] SONG Z L, CAO X L, HORNG T L, et al. Selectivity of the KcsA potassium channel: analysis and computation[J]. *Physical Review E*, 2019, 100: 022406.

- [27] 曾德慧, 尤文忠, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林天然更新特征[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1): 1-5.
ZENG Dehui, YOU Wenzhong, FAN Zhiping, et al. Natural regeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(1): 1-5.
- [28] 周晏平, 雷泽勇, 赵国军, 等. 病虫害对沙地樟子松树高生长的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 653-661.
ZHOU Yanping, LEI Zeyong, ZHAO Guojun, et al. Impacts of plant diseases and insect pests on tree height growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy land[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 653-661.
- [29] ZHOU Y P, LEI Z Y, ZHOU F Y, et al. Impact of climate factors on height growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*[J]. PLoS One, 2019, 14(3): e0213509.
- [30] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 621-629.
YU Deliang, LEI Zeyong, ZHANG Yansong, et al. Soil enzyme activity and its affecting factors under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 621-629.
- [31] 雷泽勇, 于东伟, 周凤艳, 等. 樟子松人工林营建对土壤颗粒组成变化的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5367-5376.
LEI Zeyong, YU Dongwei, ZHOU Fengyan, et al. Effects of afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on change of soil particle size distribution in sandy land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5367-5376.
- [32] 周凤艳, 张欣月, 赵志浩, 等. 樟子松固沙林生长对土壤磷素变化的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 635-645.
ZHOU Fengyan, ZHANG Xinyue, ZHAO Zhihao, et al. Effects of sand-fixing forest growth of Mongolian pine on soil phosphorus change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 635-645.
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 49-90.
- [34] 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 Shaohui, ZHAO Jiancheng, SU Wenhui, et al. Comprehensive evaluation of soil quality in *phyllostachys edulis* stands of different stocking densities[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(10): 1-9.
- [35] 周健民, 沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 223.
- [36] 董鹏, 任悦, 高广磊, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松枯落物和土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(8): 1354-1363.
DONG Peng, REN Yue, GAO Guanglei, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in the litter and soil of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Hulunbuir Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(8): 1354-1363.
- [37] 刘娜, 余维维, 秦树高, 等. 毛乌素沙地风沙土粒径和矿物组成对固定态铵含量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 131-138.
LIU Na, SHE Weiwei, QIN Shugao, et al. Effects of particle size and mineral composition on fixed ammonium of aeolian sandy soil in the Mu Us Sandy Land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(23): 131-138.
- [38] 赵啸龙, 谢玉鸿, 马旭君, 等. 科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 134-141.
ZHAO Xiaolong, XIE Yuhong, MA Xujun, et al. Vegetation structure and its relationship with soil physicochemical properties in restoring sandy grassland in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2): 134-141.
- [39] 钱甲龙, 孙鹤嘉, 刘强, 等. 植被恢复对塞罕坝地区土壤养分质量的影响(2002—2022年)[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(8): 126-133.
QIAN Jialong, SUN Hejia, LIU Qiang, et al. Effects of vegetation restoration on soil nutrient quality in the Saihanba Region (2002-2022)[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(8): 126-133.
- [40] 彭浩, 邵明安, 张兴昌. 黄土区土壤钾素径流流失机理研究进展[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 172-177.
PENG Hao, SHAO Ming'an, ZHANG Xingchang. Mechanism of soil potassium loss by erosion in loess area[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(2): 172-177.
- [41] 孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 732-738.
SUN Qianhui, WU Xia, WANG Meizhen, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 732-738.
- [42] 于明坚, 陈启瑞. 青冈常绿阔叶林钾的生物循环研究[J]. 植物研究, 1999, 19(4): 461-468.
YU Mingjian, CHEN Qichang. Biocycle of potassium in an evergreen broad-leaved forest dominated by *Cyclobalanopsis glauca* in Se, China[J]. Bulletin of Botanical Research, 1999, 19(4): 461-468.
- [43] 郭琦, 王新杰, 衣晓丹. 不同林龄杉木纯林林下生物量与土壤理化性质的相关性[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(3): 85-88, 98.
GUO Qi, WANG Xinjie, YI Xiaodan. Correlation of understory biomass and soil under *Cunninghamia lanceolata* pure forest of different age[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(3): 85-88, 98.
- [44] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4521-4530.
SHU Weiwei, LU Lihua, LI Hua, et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [45] 张明辉, 尹昀洲, 王珂, 等. 水曲柳人工林空间结构特征对土壤养分含量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(9): 73-82.
ZHANG Minghui, YIN Yunzhou, WANG Ke, et al. Effects of spatial structure characteristics of *Fraxinus mandshurica* plantation on soil nutrient content[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(9): 73-82.
- [46] 蔡琴, 丁俊祥, 张子良, 等. 青藏高原东缘主要针叶树种叶片碳氮磷化学计量分布格局及其驱动因素[J]. 植物生态学报, 2019, 43(12): 1048-1060.
CAI Qin, DING Junxiang, ZHANG Ziliang, et al. Distribution patterns and driving factors of leaf C, N and P stoichiometry of coniferous species on the eastern Qinghai-Xizang Plateau, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(12): 1048-1060.
- [47] 孟鹏, 张柏习, 王曼. 科尔沁沙地赤松和樟子松根系生物量分配与构型特征[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2935-2941.
MENG Peng, ZHANG Baixi, WANG Man. Biomass distribution and architecture of roots in *Pinus densiflora* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Horqin sandy land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(10): 2935-2941.