网络出版时间:2025-12-05 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.06.006

污泥产品对石质山地油松生长及生理的影响

朱坤[1],彭祚登[1],李泽涛[1],于舰[2],刘利霞[2],王云頔[2]
(1 北京林业大学 林学院 林木资源高效生产全国重点实验室,北京 100083;2 北京市京西林场管理处,北京 101118)

[摘 要] 【目的】推动污泥产品在石质山地林地的资源化利用,为新造油松林木的快速高效生长提供科学依据。【方法】以北京市京西林场管理处木城涧分场的8年生油松为试验材料,通过石质山地田间原位试验,以不施污泥产品为对照(0 kg/株,CK),设置16 kg/株(T1)、32 kg/株(T2)、48 kg/株(T3)和64 kg/株(T4)4个施用量梯度。在施用1年后分别于5,7和9月监测油松生长指标、光合色素、养分、渗透调节物质及重金属含量的动态变化,并采用隶属函数法对油松在污泥产品不同用量处理下的生长及生理指标进行综合评价。【结果】①施用污泥产品可促进油松生长,其中T2处理油松树高、冠幅投影面积增长率最高,分别为7.0%和42.0%;T1处理油松胸径增长率(47.1%)最高。②随污泥产品施用量增加和时间推移,油松针叶光合色素含量显著增加,T4处理油松针叶总叶绿素、叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量均在9月达到最大值,分别为1.67,1.25,0.42和0.44 mg/g。③与CK相比,各污泥产品处理油松针叶除TK含量有所下降外,TN、TP含量在各月份均有显著上升;各处理TP含量随时间推移大体呈降低趋势,TN、TK含量随时间推移则呈先降低后升高趋势。④与CK相比,T2处理可溶性糖含量在9月份达到最大值(84.63 mg/g),T4处理可溶性蛋白及脯氨酸含量分别在7和5月的增长最大,分别提高了67.5%和105.2%;各处理可溶性糖含量随时间推移呈先降低后增加趋势,可溶性蛋白含量则相反,但脯氨酸含量则无明显变化规律。⑤与CK相比,污泥产品处理Cu、Zn含量无显著变化,Pb、Ni含量在各月份均有显著增加,Hg含量则显著降低;Cu、Zn、Pb含量随时间推移呈先降低后增加的趋势,Ni、Hg含量则持续降低。⑥隶属函数分析结果表明,不同处理油松生长及生理情况综合排序为T2>T1>T3>T4>CK,说明32 kg/株污泥产品对油松生长及生理特性的促进效果最好。【结论】施用污泥产品可促进石质山地油松的生长,且施用量为32 kg/株对油松生长及生理特性的促进效果最好。

[关键词] 油松;污泥产品;石质山地;森林培育
[中图分类号] S725.5 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)06-0053-09

Effects of sludge products on the growth and physiology of *Pinus tabuliformis* in stony mountainous areas

ZHU Kun[1], PENG Zuodeng[1], LI Zetao[1], YU Jian[2], LIU Lixia[2], WANG Yundi[2]
(1 *State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2 *Beijing Jingxi Forest Farm Management Office, Beijing* 101118, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to promote the utilization of sludge products as resources in stony mountainous forest land, to provide scientific application basis for the rapid and efficient growth of newly planted *Pinus tabuliformis*. 【Method】 With 8-year-old *P. tabuliformis* trees from the Muchengjian Branch of the Beijing Jingxi Forest Farm Management Office as experimental materials, an in-situ field experiment was conducted in stony mountainous areas. With no sludge product application (0 kg/plant) as the control (CK), four application gradients were established: 16 kg/plant (T1), 32 kg/plant (T2), 48 kg/plant (T3), and 64 kg/plant

[收稿日期] 2025-04-03 [修回日期] 2025-06-25
[基金项目] 国家发展改革委环境污染第三方治理项目(2017HXFWLXY023);北京城市排水集团委托项目(BJPS-2022-JT-NCB-SC-0037)
[作者简介] 朱坤(2000—),男,山西长治人,硕士,主要从事污泥产品林地应用研究。E-mail:zk178932@163.com
[通信作者] 彭祚登(1964—),男,重庆开州人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林培育理论与技术研究。E-mail:zuodeng@sina.com

(T4).【Result】①The application of sludge products could promote the growth of *P. tabuliformis*. The highest increases in the tree height and crown projection area were observed in T2 treatment, which were 7.0% and 42.0%, respectively. The highest increase in the diameter at breast height of *P. tabuliformis* was observed in T1 treatment, which was 47.1%. ②With the increase in the application rate of sludge products and the passage of time, the contents of photosynthetic pigments in the needles of *P. tabuliformis* increased significantly. The highest contents of total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids were observed under the T4 treatment in September, which were 1.67, 1.25, 0.42 and 0.44 mg/g respectively. ③Compared with CK, the contents of TN and TP in the needles of *P. tabuliformis* under all sludge product treatments increased significantly in each month, while the content of TK decreased. The content of TP under each treatment generally decreased over time, while the contents of TN and TK first decreased and then increased. ④Compared with CK, the highest content of soluble sugar (84.63 mg/g) was observed under the T2 treatment in September. The highest increase in the contents of soluble protein and proline under the T4 treatment was observed in July and May, which were 67.5% and 105.2%, respectively. The content of soluble sugar under each treatment decreased first and then increased over time, while the content of soluble protein increased first and then decreased. And the content of proline had no obvious change pattern. ⑤Compared with CK, no significant diffe-rence was observed in the contents of Cu and Zn under sludge product application. The contents of Pb and Ni increased significantly in each month, while the content of Hg decreased significantly. The contents of Cu, Zn and Pb under each treatment decreased first and then increased over time, while the contents of Ni and Hg continued to decrease. ⑥The results of membership function analysis indicated that the comprehensive ranking of the growth and physiological conditions of *P. tabuliformis* under different treatments was T2>T1>T3>T4>CK, indicating that the application of 32 kg/plant of sludge product had the greatest promotive effect.【Conclusion】The application of sludge products can enhance the growth of *P. tabuliformis* in stony mountainous areas, with the optimal dosage of 32 kg/plant demonstrating the most significant improvement in both growth and physiological characteristics.

Key words: *Pinus tabuliformis*; sludge products; stony mountain; silviculture

城市人口的增加和消费水平的提高导致城市污泥产量总量增加,自2013年以来,我国城市污水处理厂污泥产量呈持续增长趋势,但处理率并未显著提高,预计2025年将超过9 000万t(80%含水量)[1-2]。其中北京市日均产生约2 000 t污泥,处置压力大[3],协调及拓宽污泥处置的出路可为污泥长期资源化利用提供有效途径。

目前,"厌氧消化-土地利用"是污泥处理处置的优选技术,具有低耗、低碳的特点[4-5],但其仅占我国污泥处理处置技术的15.55%[6],污泥中所含的重金属是污泥土地利用过程中的主要污染物[7],也是厌氧技术推广应用的主要限制因子。尽管我国市政污泥重金属污染水平较低,但长期施用污泥仍有造成土壤重金属超标的风险[8],因此合理科学的施用量、施用年限以及连续有效的监测,可进一步提高污泥土地利用的安全性。

经过处理得到的污泥产品富含有机质、氮、磷、钾等植物所需营养物质,在促进植物生长的同时也可改善土壤。目前污泥土地利用的处置方向多为苗圃、林地和园林绿化方向,具体而言,在种子萌发[9]、苗木培育[10-11]、植物配置[12-13]、矿山修复及平原生态林[14-15]中发挥着重要作用,但在石质山地造林方面的应用尚未见报道。山地远离城市和水源,且土壤养分含量低,将污泥产品应用于石质山地能最大程度避开食物链,被认为是污泥处置最具潜力的方式。本研究选取北京市石质山地新造林地区作为试验地,以8年生油松(*Pinus tabuliformis*)作为研究对象进行原位试验,通过施用经厌氧消化处理的不同量污泥产品,探讨其对油松生长及生理的影响,明确适用于石质山地油松生长的污泥产品最佳施用量,为污泥产品在石质山地人工林中的应用推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于北京市京西林场管理处木城涧分场(39°57′ N,115°54′ E),属于温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温7~10 ℃,年平均降水量

500～600 mm，无霜期 150～180 d。土壤类型为地带性褐土，有机质含量低；水系以永定河及其支流为主；森林植被丰富，垂直分布明显。

1.2　试验材料

供试污泥产品取自北京城市排水集团有限责任公司污泥资源中心庞各庄污泥处置厂，为城市生活污水污泥经高温热水解、厌氧消化、板框脱水及破碎处理等一系列工艺制成的污泥产品。其基本理化性质为 pH 8.29，有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 392，30.0，32.0，19.9 g/kg，Cu、Zn、Pb、Ni、Hg 含量分别为 194，563，13.2，30.1 和 7.56 mg/kg，上述指标均符合污泥产品林用限值[16]。

1.3　试验设计

本试验将城市污泥产品作为试验因素，共设置 5 个施用量梯度，分别为 0，16，32，48 和 64 kg/株，依次记为 CK、T1、T2、T3 和 T4 处理。2023 年 7 月进行试验布设，根据京西林场 2020 年浅山台地所造油松数量及布局情况，选择 3 行油松作为污泥产品处理区域（T1～T4），其中 T3 和 T4 在同一行，T1 和 T2 在同一行，中间一行油松作为保护行不施用污泥产品，与处理行间隔 3.0 m，在处理区域右侧选择一行油松作为对照（CK），每行选择 18 株长势基本一致的油松进行定株试验，即各处理 18 个重复，株距 2.5 m，共计 90 株。施污泥穴半径 70 cm（以树干为圆心），深 15 cm。

1.4　样品采集

分别于 2024 年 5，7 和 9 月中旬进行油松当年生针叶采样，在每处理行选取 6 株林木作为取样树种，每间隔 2 株取 1 株，剪取胸径所在高度枝条顶端当年生针叶，以胸径处当年生针叶代表整个冠层。所有样品装入冰盒立即带回实验室进行清洗、晾干。所采集的针叶经混合后一部分用锡纸包装后过液氮存于－80 ℃超低温冰箱，用于鲜样测定；另一部分装入信封于 105 ℃杀青 30 min，80 ℃烘至质量恒定，用研磨仪研磨后过 0.25 mm 筛，装入自封袋用于干样测定。

1.5　测定指标及方法

1.5.1　生长指标　油松生长指标基础值于 2023 年 7 月施用污泥产品前测定，施用 1 年后（2024 年 9 月）对其进行再次测定，计算增长率。其中，树高使用 CGQ-1 型测高器测定；胸径使用钢围尺测定；油松东西和南北方向的冠长均采用卷尺测定，并使用式（1）计算冠幅投影面积。

$$S=\pi ab/4。\tag{1}$$

式中：S 为冠幅投影面积，m^2；a 为油松东西方向的冠长，m；b 为南北方向的冠长，m。

1.5.2　光合色素含量　油松当年生针叶光合色素包括叶绿素 a（Chl a）、叶绿素 b（Chl b）、总叶绿素（Chl（a＋b））和类胡萝卜素（Car）。将针叶鲜样剪碎后采用乙醇浸提法[17]获得提取液，使用分光光度计测定吸光度值并计算其含量。

1.5.3　养分含量　油松当年生针叶养分包括全氮（TN）、全磷（TP）、全钾（TK），经浓 H_2SO_4 消煮后获得养分待测液。使用凯氏定氮仪测定全氮含量，采用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES）测定全磷含量，采用火焰原子吸收光谱仪测定全钾含量。

1.5.4　渗透调节物质含量　采用蒽酮-硫酸法[18]测定可溶性糖（soluble sugars，SS）含量，采用考马斯亮蓝 G-250 法[18]测定可溶性蛋白（soluble proteins，SP）含量，使用酸性茚三酮法[19]测定脯氨酸（proline，Pro）含量。

1.5.5　重金属含量　油松当年生针叶重金属元素选取铜（Cu）、锌（Zn）、铅（Pb）、镍（Ni）、汞（Hg）作为测定指标，经 HNO_3-$HClO_4$ 消解后获得重金属待测液。采用火焰原子吸收光谱仪测定 Cu 和 Zn 含量，采用石墨炉原子吸收光谱仪测定 Pb 含量，采用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES）测定 Ni 含量，采用电感耦合等离子体发射质谱仪（ICP-MS）测定 Hg 含量。

1.6　数据处理

采用隶属函数法对不同用量污泥产品施用后油松生长及生理特性进行综合评价，其中生长指标（树高增长率、胸径增长率、冠幅投影面积增长率）、光合色素含量（Chl（a＋b））、养分含量（TN、TP、TK）、渗透调节物质含量（SS、SP、Pro）为正向指标，采用式（2）计算；重金属含量（Cu、Zn、Pb、Ni、Hg）为负向指标，采用式（3）计算。

$$R(X_{ij})=(X_{ij}-X_{j\min})/(X_{j\max}-X_{j\min});\tag{2}$$

$$R(X_{ij})=(X_{j\max}-X_{ij})/(X_{j\max}-X_{j\min})。\tag{3}$$

式中：i（i=1，2，…，n）为不同污泥产品处理；j（j=1，2，…，m）为评价指标；X_{ij} 为第 i 个处理下油松评价指标 j 的实测值；$X_{j\max}$ 和 $X_{j\min}$ 分别是所有处理评价指标 j 的最大值和最小值；$R(X_{ij})$ 为第 i 个处理下 j 指标的隶属函数值。

采用 Excel 2016 进行试验数据的整理与分析，

利用SPSS 24.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan's多重比较($P<0.05$),采用Origin 2021绘图,试验数据均用"平均值±标准误"表示。

2 结果与分析

2.1 污泥产品对油松生长的影响

由图1可知,与施用污泥产品前(2023年7月)相比,施用污泥产品1年后油松的树高、胸径及冠幅投影面积均有所增长。其中,油松树高及冠幅投影面积增长率均在T2处理下最高,分别为7.0%和42.0%;胸径增长率随污泥产品用量增加呈先增加后降低趋势,在T1处理下最高,为47.1%。上述生长指标增长率在T3和T4处理下均呈降低趋势,表明过量施用污泥产品会减缓其对油松生长的促进效益。

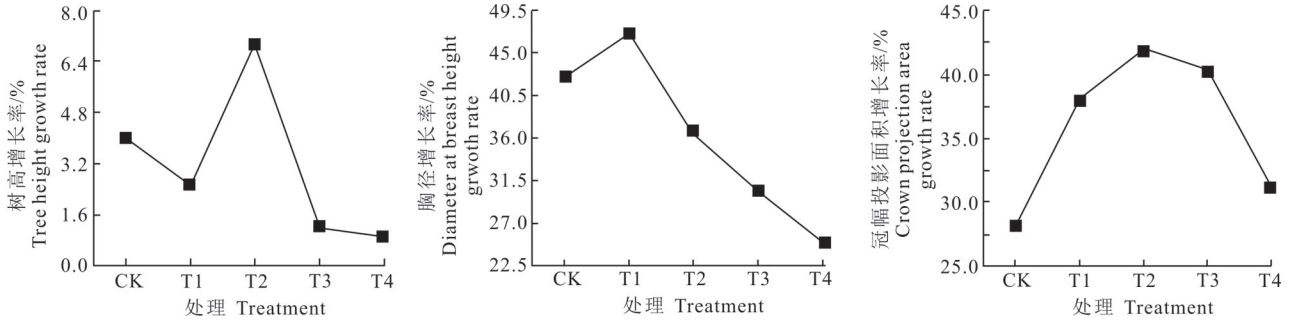


图1 不同用量污泥产品对油松生长的影响

Fig. 1 Effects of different sludge product dosages on the growth of *Pinus tabuliformis*

2.2 污泥产品对油松针叶生理生化指标的影响

2.2.1 光合色素含量 由表1可知,与CK相比,施用污泥产品可促进油松针叶光合色素含量的增加。在5和7月份,光合色素含量均在T3处理达到最大值;9月份除T3处理总叶绿素和叶绿素a含量有所降低外,其他光合色素含量均呈上升趋势,且均在T4处理达到最大值,总叶绿素、叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量分别为1.67,1.25,0.42和0.44 mg/g。

表1 污泥产品对油松针叶光合色素含量的影响

Table 1 Effects of sludge product on photosynthetic pigment content in *Pinus tabuliformis* needles mg/g

处理 Treatment	叶绿素a含量 Chl a content			叶绿素b含量 Chl b content		
	5月 May	7月 Jul.	9月 Sep.	5月 May	7月 Jul.	9月 Sep.
CK	0.23±0.01 bC	0.63±0.01 aB	0.78±0.03 cA	0.08±0.01 bB	0.20±0.01 abA	0.24±0.01 dA
T1	0.32±0.01 aC	0.52±0.02 bB	1.03±0.01 bA	0.09±0.01 abC	0.18±0.01 bB	0.33±0.01 cA
T2	0.32±0.01 aC	0.55±0.03 abB	1.10±0.03 bA	0.09±0.01 abC	0.19±0.01 bB	0.34±0.01 cA
T3	0.36±0.00 aB	0.63±0.06 aAB	1.06±0.03 bA	0.11±0.00 aB	0.24±0.02 aAB	0.37±0.00 bA
T4	0.33±0.01 aC	0.58±0.02 abB	1.25±0.02 aA	0.11±0.01 aC	0.20±0.01 abB	0.42±0.00 aA

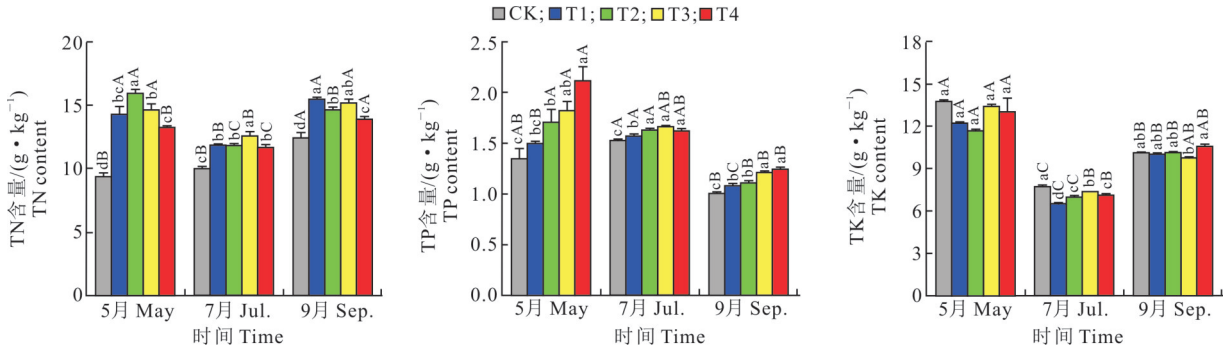
处理 Treatment	类胡萝卜素含量 Car content			总叶绿素含量 Chl(a+b) content		
	5月 May	7月 Jul.	9月 Sep.	5月 May	7月 Jul.	9月 Sep.
CK	0.07±0.00 bC	0.23±0.00 abB	0.28±0.01 cA	0.30±0.02 bC	0.84±0.02 abB	1.03±0.04 cA
T1	0.11±0.00 aC	0.19±0.00 bB	0.37±0.00 bA	0.41±0.02 aC	0.70±0.03 bB	1.37±0.02 bA
T2	0.10±0.01 aC	0.20±0.01 abB	0.38±0.01 bA	0.41±0.02 aC	0.74±0.03 abB	1.45±0.03 bA
T3	0.12±0.00 aB	0.24±0.03 aAB	0.38±0.01 bA	0.47±0.01 aB	0.87±0.09 aAB	1.43±0.03 bA
T4	0.11±0.01 aC	0.22±0.01 abB	0.44±0.00 aA	0.44±0.02 aC	0.78±0.03 abB	1.67±0.01 aA

注:同列数据后不同小写字母表示同一月份不同处理间差异显著($P<0.05$),同行数据后不同大写字母表示同一处理不同月份间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences between different treatments in the same month ($P<0.05$), while different uppercase letters after the same row of data indicate significant differences between different months under the same treatment ($P<0.05$).

由表1还可知,随着时间推移,各处理油松针叶光合色素含量均呈上升趋势,9月各处理光合色素含量均显著高于5和7月($P<0.05$),7月各处理光合色素含量均显著高于5月($P<0.05$),表明油松当年生针叶的光合色素含量会随时间推移有所提高和积累。

2.2.2　养分含量　由图2可知，与CK相比，各污泥产品处理下油松针叶的TN、TP含量均显著升高（$P<0.05$），TN含量在5月份的T2处理下达到最大值，为15.93 g/kg；TP含量在5月份的T4处理达到最大值，为2.12 g/kg；7月份各污泥产品处理下TK含量较CK显著降低，其余月份各污泥产品处理与CK相比均无显著变化。由图2还可知，随着时间推移，相同处理下TN、TK含量均呈先降低后增加趋势（除CK的TN含量外）；CK和T1处理的TP含量呈先增加后降低趋势，而T2、T3和T4处理的TP含量则呈逐渐降低趋势。整体来看，7月份各处理油松针叶的TN、TP和TK含量均低于5月份；9月份各处理油松针叶的TN、TK含量较7月份有所增加，而TP含量则持续降低。



图柱上不同小写字母表示同一月份不同处理间差异显著（$P<0.05$），不同大写字母表示同一处理不同月份间差异显著（$P<0.05$）。图3同。

Different lowercase letters on the column indicate significant differences between different treatments in the same month ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences between different months in the same treatment ($P<0.05$). The same as in Fig. 3.

图2　污泥产品对油松针叶养分含量的影响

Fig. 2　Effects of sludge product on nutrient content in *Pinus tabuliformis* needles

2.2.3　渗透调节物质含量　由图3可知，随着污泥产品施用量的增加，5和7月份油松针叶可溶性糖含量呈先降低后增加趋势；9月则相反，T2处理油松针叶可溶性糖含量最高，为84.63 mg/g，是CK的1.2倍。除T3处理外，其余处理油松针叶可溶性糖含量均随时间推移呈先降低后增加趋势，9月份各处理油松针叶可溶性糖含量显著高于7月份（$P<0.05$）。

由图3还可知，随着污泥产品施用量的增加，5和9月份油松针叶可溶性蛋白含量呈先降低后增加再降低趋势，CK处理油松针叶可溶性蛋白含量最高，分别为20.30和11.62 mg/g；7月份油松针叶可溶性蛋白含量呈先降低后增加趋势，在T4处理达到最大值，为132.26 mg/g。除T2处理外，7月份其他处理油松针叶可溶性蛋白含量均显著高于5和9月份（$P<0.05$），但相同处理在5与9月份之间无显著差异；随时间推移，各处理油松针叶可溶性蛋白含量整体呈先增加后降低趋势。

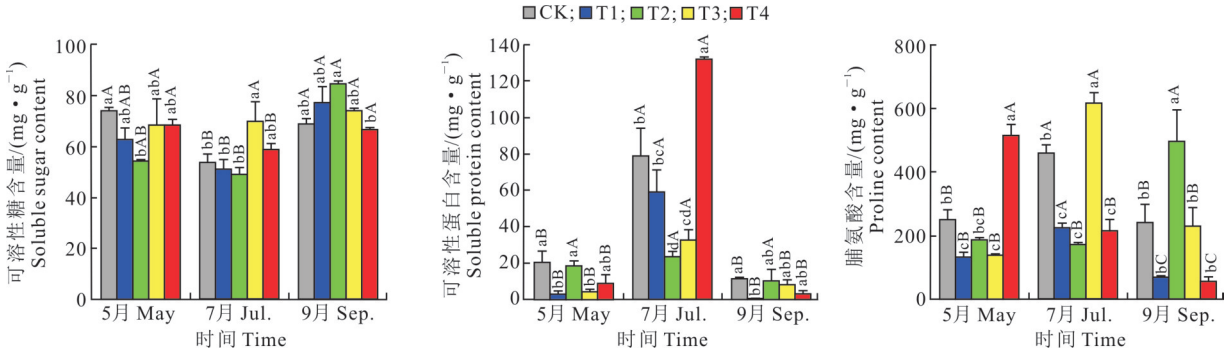


图3　污泥产品对油松针叶渗透调节物质含量的影响

Fig. 3　Effects of sludge product on osmotic regulation substance content in *Pinus tabuliformis* needles

图3显示，随着污泥产品施用量的增加，不同时间油松针叶脯氨酸含量大致呈先降低后增加趋势，5，7，9月份油松针叶脯氨酸含量分别在T4、T3和T2处理下达到最大值，分别为CK的2.1，1.3，2.1倍；CK、T1、T3处理7月份的脯氨酸含量显著高于5和9月份（$P<0.05$），T2处理9月份的脯氨酸含量

显著高于5和7月份($P<0.05$),T4处理5月份的脯氨酸含量显著高于7和9月份。

2.2.4 重金属含量 由表2可知,随污泥产品施用量的增加,5月份油松针叶Cu、Zn含量无显著变化,7,9月份均呈先降低后增加再降低趋势,除T3处理7月份Zn含量外,其余处理Cu、Zn含量在7和9月份均低于CK;不同月份油松针叶Pb含量均呈先增加后降低趋势,5和9月份均在T1处理下最高,分别为0.26和0.23 mg/kg,7月份在T2处理下最高,较CK提高了176.7%;Ni含量在5和7月份均呈显著增加趋势,均在T4处理达到最大值,分别为1.55和0.25 mg/kg;Hg含量则与之相反,均呈显著降低趋势,且均在T4处理达到最小值,分别为25.39和5.79 mg/kg。由表2还可知,除T4处理Zn含量和T2处理Pb含量外,随时间推移各处理油松针叶的Cu、Zn、Pb含量均呈先降低后增加趋势;Ni含量呈显著降低趋势;CK、T1处理Hg含量显著降低,T2~T4处理Hg含量呈先降低后增加趋势。

表2 污泥产品对油松针叶重金属含量的影响

Table 2 Effects of sludge product on heavy metal content in *Pinus tabuliformis* needles

时间 Time	处理 Treatment	Cu含量/(mg·kg^{-1}) Cu content	Zn含量/(mg·kg^{-1}) Zn content	Pb含量/(mg·kg^{-1}) Pb content	Ni含量/(mg·kg^{-1}) Ni content	Hg含量/(μg·kg^{-1}) Hg content
5月 May	CK	6.24±0.31 aB	39.69±2.85 aA	0.10±0.01 bA	0.98±0.01 dA	34.38±1.55 aA
	T1	6.52±0.43 aA	35.93±0.78 aA	0.26±0.05 aA	1.21±0.00 cA	28.77±1.45 bA
	T2	6.46±0.48 aAB	33.79±0.28 aA	0.12±0.01 bA	1.21±0.02 cA	25.89±0.16 bA
	T3	5.59±0.29 aB	35.00±1.01 aA	0.14±0.01 bAB	1.33±0.02 bA	25.67±1.12 bA
	T4	5.83±0.16 aB	36.48±0.37 aA	0.12±0.01 bA	1.55±0.00 aA	25.39±1.74 bA
7月 Jul.	CK	4.80±0.05 aC	32.76±0.22 abB	0.04±0.01 aB	0.10±0.03 bB	26.23±1.08 aB
	T1	4.43±0.08 bB	32.52±0.48 abB	0.11±0.02 aB	0.20±0.01 abB	16.25±2.06 bB
	T2	4.03±0.17 cB	30.26±1.31 bA	0.12±0.04 aA	0.19±0.01 abB	10.19±0.76 cB
	T3	4.71±0.10 abC	34.03±0.39 aA	0.08±0.01 aB	0.20±0.01 abB	8.11±0.35 cdC
	T4	3.63±0.08 dC	32.52±0.79 abB	0.09±0.01 aA	0.25±0.03 aB	5.79±0.77 dC
9月 Sep.	CK	11.23±0.58 aA	40.17±1.96 aA	0.08±0.01 bAB	0.05±0.00 bB	20.57±1.67 aC
	T1	6.69±0.22 abA	37.60±1.06 aA	0.23±0.03 aAB	0.03±0.00 bC	6.25±1.55 cC
	T2	6.73±0.02 abA	33.98±2.98 aA	0.22±0.04 aA	0.10±0.02 aC	13.35±1.72 bAB
	T3	7.91±0.27 abA	37.44±1.37 aA	0.19±0.04 abA	0.05±0.01 bC	11.10±0.66 bB
	T4	6.52±0.03 bA	32.32±0.41 aB	0.16±0.05 abA	0.06±0.01 bC	10.78±0.45 bB

注:同列数据后不同小写字母表示同一月份不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一处理不同月份间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences between different treatments in the same month ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences between different months in the same treatment ($P<0.05$).

2.3 油松生长及生理指标综合评价

采用隶属函数法对不同用量污泥产品处理下油松生长及生理指标进行综合评价,隶属函数值越大,表明油松生长效果越好。由表3可知,不同处理(CK~T4)下油松生长及生理指标综合平均隶属函数值分别为0.362,0.561,0.646,0.517,0.499,从大到小依次为T2>T1>T3>T4>CK,表明T2处理下油松生长效果最好。从表4可直观看出污泥产品处理下油松生长及生理性状的平均隶属函数值,其中T2处理下油松各性状的平均隶属函数值均超过0.5,较为均衡;尽管T4处理下油松光合色素、养分及重金属含量的平均隶属函数值最高,但其生长指标及渗透调节物质含量的平均隶属函数值最低。综合来看,油松在T2处理下的生长效果及生长潜力高于其他处理。

3 讨 论

3.1 污泥产品对油松生长的影响

适量施用污泥产品可促进油松生长,从增长率的角度来看,污泥产品对油松生长大致表现为"低促高抑",这与多数研究结果相似。孙昱等[15]研究表明,当污泥有机肥增加到45 kg/株时,油松的树高及冠幅增量均下降;王冰清等[20]研究表明,50%比例污泥处理促进了湿地松(*Pinus elliottii*)株高、地径的生长及生物量积累,但100%比例污泥处理则会抑制其生长及生物量积累,可能是高量污泥产品所含重金属等有害物质较多,被林木吸收后会减缓其生长所致。

表 3　污泥产品处理下油松生长及生理指标的隶属函数值

Table 3　Membership function values of the growth and physiological indices of *Pinus tabuliformis* under sludge product treatment

处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value								平均值 Average value	排名 Ranking
	树高增长率 Tree height growth rate	胸径增长率 DBH growth rate	冠幅投影面积增长率 Crown projection area growth rate	Chl(a+b)	TN	TP	TK			
CK	0.511	0.790	0.000	0.097	0.183	0.090	0.476			
T1	0.273	1.000	0.713	0.554	0.961	0.361	0.414			
T2	1.000	0.521	1.000	0.661	0.744	0.452	0.522			
T3	0.051	0.246	0.891	0.642	0.891	0.773	0.196			
T4	0.000	0.000	0.219	0.967	0.564	0.899	0.851			
处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value								平均值 Average value	排名 Ranking
	SS	SP	Pro	Cu	Zn	Pb	Ni	Hg		
CK	0.147	0.513	0.329	0.137	0.292	0.916	0.785	0.167	0.362	5
T1	0.487	0.012	0.062	0.939	0.484	0.241	0.993	0.915	0.561	2
T2	0.789	0.455	0.729	0.932	0.755	0.302	0.290	0.544	0.646	1
T3	0.363	0.357	0.314	0.724	0.496	0.429	0.731	0.662	0.517	3
T4	0.067	0.130	0.040	0.969	0.880	0.536	0.687	0.678	0.499	4

表 4　污泥产品处理下油松生长及生理指标的平均隶属函数值

Table 4　Mean membership function values of the growth and physiological indices of *Pinus tabuliformis* under sludge product treatment

处理 Treatment	平均隶属函数值 Mean membership function value				
	生长 Growth	光合色素含量 Photosynthetic pigment content	养分含量 Nutrient content	渗透调节物质含量 Osmoregulatory substance content	重金属含量 Heavy metal content
CK	0.434	0.097	0.250	0.330	0.459
T1	0.662	0.554	0.579	0.187	0.714
T2	0.840	0.661	0.573	0.658	0.565
T3	0.396	0.642	0.620	0.345	0.608
T4	0.073	0.967	0.771	0.079	0.750

3.2　污泥产品对油松针叶光合生理及养分含量的影响

光合色素含量是表征植物光合作用和生长状况的重要指标，且对环境胁迫具有较高的敏感性，可用于环境污染和植物受胁迫程度监测等方面[21]。本研究发现，随污泥产品施用量的增加和时间的推移，油松针叶光合色素含量显著增加，污泥产品富含N、P等营养元素，针叶N、P的增加可促进叶绿素合成[22]。5月份油松针叶尚处在幼叶阶段，叶片光合结构未发育完全，此时光合色素含量较低；随着污泥产品施用量增加和时间延长，油松针叶逐渐发育为成熟叶，其光合色素含量显著升高。7月份油松针叶光合色素含量的波动性变化可能与降水及温度变化有关[23-24]。T4处理（64 kg/株）光合色素含量在5和7月份有所下降，9月份则显著增加，表明油松针叶对高量污泥产品存在一个适应过程，从而使得光合色素含量的变化存在滞后效应。

本研究结果表明，施用污泥产品可显著促进油松针叶对TN和TP的吸收，但对TK吸收影响不显著甚至出现降低情况，表明油松生长过程中更侧重于对TN和TP的吸收。从土壤理化性质来看，土壤中TN和TP较为缺乏，在施用污泥产品后，增加土壤养分的同时也促进了油松对缺乏元素N、P的吸收。7月份油松针叶养分含量整体降低，可能是这一阶段油松处于生长旺盛期，养分消耗增加；同时随着温度升高和降水量增加，影响了土壤中养分的有效性，进而影响叶片对养分的吸收，且当年生针叶对于环境变化的响应较为灵敏[25]，所以7月份油松养分含量整体低于5月份。9月份生长季将近结束，环境变化及生长积累需求促使针叶养分含量有所回升。

3.3　污泥产品对油松针叶胁迫生理及重金属含量的影响

污泥产品中所含的重金属等有害物质可能会使植物处于胁迫环境，诱导产生渗透调节物质如可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸等来调节细胞内的渗

透平衡[26],从而提高植物的抗性。俎丽红等[27]研究表明,白皮松(*Pinus bungeana*)针叶中可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸等渗透调节物质对重金属造成的氧化胁迫具有指示作用,白皮松主要通过积累上述渗透调节物质来抵御重金属胁迫。本研究中,除9月份的可溶性糖含量外,其他月份上述3种渗透调节物质大致呈先降低后增加趋势,且多低于CK或与CK无显著差异,表明污泥产品中所含重金属等有害物质不会对油松产生明显毒害作用,CK处理的养分缺乏可能是造成上述3种渗透调节物质含量高的原因之一[28]。此外,针叶养分含量和重金属含量的变化表明,污泥产品所带来的养分促进效益大于重金属的胁迫作用。生长旺盛期油松针叶(7月)可溶性糖含量的降低与可溶性蛋白含量的升高有助于抑制松毛虫种群数量[29],提高其抗性。5—9月油松针叶脯氨酸含量在T2~T4处理下均显著上升,可溶性糖、可溶性蛋白含量分别在7月的T3、T4处理下显著上升,表明不同时期高量污泥处理下油松主要通过积累脯氨酸来响应胁迫,生长旺盛期三者协同发挥作用。

施用污泥产品可能会导致植物体内重金属含量增加,进而影响植物的正常生长发育。因此,对植物体内重金属含量的持续监测是评估植物健康状况的关键,同时有助于揭示重金属在植物体内的动态变化,为制定有效的植物生长策略和土壤管理措施提供科学依据。本研究中,除Ni和Pb含量在施用污泥产品后有显著增加外,其他重金属含量随污泥产品施用量增加均无显著上升趋势,且多低于或显著低于CK处理,从侧面反映了重金属之间的协同或拮抗作用,使得植物体内重金属环境处于动态变化当中[30]。植物对某种或某几种元素的吸收会影响其对其他元素的吸收,所以与CK相比,污泥处理组重金属含量变化总体上并不明显,施用污泥产品并不会对油松产生较高的重金属胁迫。所有污泥处理重金属含量均在7月有所降低,9月除Ni含量以及CK、T1处理的Hg含量有所降低外,其余处理的重金属含量均有所上升或显著升高,这与李少宁等[31]研究的北京市常见绿化树种叶片重金属含量的季节动态变化相似,5月份属于油松生长初期,树木生理活动旺盛,对元素吸收能力强;7月份受到温度和降水的影响及叶片生长的"稀释作用",叶片重金属含量有所降低;9月份进入缓慢生长期,重金属元素在叶片中不断累积,从而形成新的上升趋势。Ni含量持续降低可能与土壤Ni的有效性或植物对其的再分配利用有关[31-32]。

4 结 论

污泥产品可促进石质山地油松的生长。随着污泥产品施用量的增加和时间的推移,油松当年生针叶的光合色素含量及养分含量均显著增加。高量污泥产品施用下油松主要依赖脯氨酸积累来应对重金属等有害物质所带来的胁迫,生长旺盛期可溶性蛋白和可溶性糖含量也发挥积极作用。与CK相比,施用污泥产品后,油松当年生针叶中Ni、Pb、Hg含量均有显著变化,而Cu、Zn含量则变化不明显;重金属含量在油松旺盛生长期降低,生长后期有所积累回升。通过隶属函数法对不同用量污泥产品处理下油松生长及生理特性进行综合评价,筛选出最适宜油松生长的污泥产品施用量为32 kg/株。表明施用32 kg/株污泥产品对油松生长及生理特性的促进效果最好。

[参考文献]

[1] WANG H X, XU J L, LIU Y Q, et al. Preparation of ceramsite from municipal sludge and its application in water treatment: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 287: 112374.

[2] GUO Y Q, GUO Y L, GONG H, et al. Variations of heavy metals, nutrients, POPs and particle size distribution during "sludge anaerobic digestion-solar drying-land utilization process": case study in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149609.

[3] 李雪怡,梁远,方小锋,等. 北京市污泥处理处置现状总结分析[J]. 中国给水排水,2021,37(22):38-42.
LI X Y, LIANG Y, FANG X F, et al. Summarization and analysis of sludge treatment and disposal in Beijing[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 38-42.

[4] 戴晓虎,张辰,章林伟,等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水,2021,57(3):1-5.
DAI X H, ZHANG C, ZHANG L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(3): 1-5.

[5] 赵水钎,段妮娜,谭学军,等. 城镇污泥"厌氧消化+土地利用"技术路线经济性分析[J]. 环境工程,2024,42(2):1-9.
ZHAO S Q, DUAN N N, TAN X J, et al. Economic analysis on "anaerobic digestion+land use" treatment and disposal technical route for municipal sewage sludge[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(2): 1-9.

[6] 柴宝华,李文涛,亓伟,等. 我国市政污泥处理处置现状研究[J]. 新能源进展,2023,11(1):38-44.

CHAI B H, LI W T, QI W, et al. Status of municipal sludge treatment and disposal in China[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11(1): 38-44.

[7] ZHOU H, WEI L L, WANG D S, et al. Environmental impacts and optimizing strategies of municipal sludge treatment and disposal routes in China based on life cycle analysis[J]. Environment International, 2022, 166: 107378.

[8] 许玉玉，张子晨，文龙杰，等. 面向土地利用的市政污泥堆肥重金属安全性研究进展[J]. 环境科学，2025，46(6)：3923-3933.
XU Y Y, ZHANG Z C, WEN L J, et al. Review on the safety of heavy metals during land utilization of municipal sludge after composting[J]. Environmental Science, 2025, 46(6): 3923-3933.

[9] 张天昱，唐胶，彭祚登，等. 施用排水污泥制有机营养土对国槐和刺槐种子萌发的影响[J]. 安徽农业科学，2022，50(10)：79-86，89.
ZHANG T Y, TANG J, PENG Z D, et al. Effects of organic nutrient soil made from urban sewage sludge on seed germination of *Sophora japonica* and *Robinia pseudoacacia*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(10): 79-86, 89.

[10] 彭远航，冯嘉仪，龙凤玲，等. 三种园林植物幼苗生长节律对城市污泥的响应[J]. 生态学杂志，2024，43(10)：3055-3065.
PENG Y H, FENG J Y, LONG F L, et al. Growth rhythm of three landscape plant species planting on municipal sewage sludge[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(10): 3055-3065.

[11] 唐胶，彭祚登，贾清棋，等. 添加城市排水污泥对竹柳和欧美107杨嫩枝扦插苗生长及养分积累的影响[J]. 北京林业大学学报，2020，42(10)：84-95.
TANG J, PENG Z D, JIA Q Q, et al. Effects of urban sewage sludge additive on growth and nutrient accumulation in *Salix americana* and *Populus*×*euramericana* cv. '74/76' softwood cuttings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(10): 84-95.

[12] 赖明丽，董晓全，谢姗宴，等. 污泥施用下园林植物生长适应性和重金属吸收[J]. 华南农业大学学报，2022，43(4)：47-57.
LAI M L, DONG X Q, XIE S Y, et al. Plant adaptability and heavy metals accumulation of different landscape plants in soil applied with sewage sludge[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(4): 47-57.

[13] WU D M, YU X L, LAI M L, et al. Diversified effects of co-planting landscape plants on heavy metals pollution remediation in urban soil amended with sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123855.

[14] 杨英杰，唐胶，崔超，等. 城镇生活污泥产品对国槐和银杏生长及氮磷钾含量的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学)，2022，42(4)：15-23.
YANG Y J, TANG J, CUI C, et al. Effects of urban sewage sludge products on the growth and nitrogen, phosphorus and potassium contents of *Sophora japonica* and *Ginkgo biloba*[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2022, 42(4): 15-23.

[15] 孙昱，彭祚登，熊建军，等. 高级厌氧消化制污泥有机肥对油松和榆树林木生长及养分积累的影响[J]. 中南林业科技大学学报，2019，39(10)：55-63.
SUN Y, PENG Z D, XIONG J J, et al. Effects of advanced anaerobic digestion sewage sludge as an organic fertilizer on growth and nutrient accumulation of *Pinus tabulaeformis* and *Ulmus pumila*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(10): 55-63.

[16] 住房和城乡建设部给水排水产品标准化技术委员会. 城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质：CJ/T 362－2011[S]. 北京：中国标准出版社，2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development Technical Committee on Standardization for Water Supply and Drainage Products. Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant: quality of sludge used in forestland: CJ/T 362－2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[17] JIANG S L, TANG Y Q, FAN R, et al. Response of *Carex breviculmis* to phosphorus deficiency and drought stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1203924.

[18] 王三根. 植物生理学实验教程[M]. 北京：科学出版社，2017.
WANG S G. Experimental course of plant physiology[M]. Beijing: Science Press, 2017.

[19] 石连旋，颜宏. 植物生理学实验指导[M]. 北京：高等教育出版社，2013.
SHI L X, YAN H. Experimental instruction of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.

[20] 王冰清，张学平，陈杰，等. 竹节树、湿地松对污泥重金属的吸附与耐受能力研究[J]. 防护林科技，2021(2)：11-15.
WANG B Q, ZHANG X P, CHEN J, et al. Absorbability and tolerance capacity of sludges heavy metals by *Carallia brachiata* and *Pinus elliottii*[J]. Protection Forest Science and Technology, 2021(2): 11-15.

[21] 王树凤，王松，舒婉钦，等. 基于光合色素含量和叶绿素荧光参数的杞柳叶片Cd积累能力预测[J]. 植物资源与环境学报，2022，31(3)：65-74.
WANG S F, WANG S, SHU W Q, et al. Prediction of Cd accumulation ability in leaves of *Salix integra* based on photosynthetic pigment contents and chlorophyll fluorescence parameters[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2022, 31(3): 65-74.

[22] 李潇，杨伟财，曹振宇，等. 施肥对红松无性系生理和激素的影响[J]. 森林工程，2023，39(2)：22-29.
LI X, YANG W C, CAO Z Y, et al. Effects of fertilization on physiology and hormones of *Pinus koraiensis* clones[J]. Forest Engineering, 2023, 39(2): 22-29.

[23] 陈曦，陈彬丽，周晨，等. 生长季油松针叶叶绿素荧光对温度变化的响应[J]. 北京林业大学学报，2011，33(6)：70-74.
CHEN X, CHEN B L, ZHOU C, et al. Response of chlorophyll fluorescence of *Pinus tabulaeformis* Carr. needles in growing seasons to temperature changes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(6): 70-74.

(下转第 71 页)