

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201910052

张听雨, 彭祚登, 贾素苹, 等. 水肥耦合对油松生态林林木生长的影响 [J]. 广西植物, 2020, 40(6): 836–844.

ZHANG TY, PENG ZD, JIA SP, et al. Effect of water fertilizer coupling on the growth of *Pinus tabulaeformis* ecological forest [J]. *Guihaia*, 2020, 40(6): 836–844.

水肥耦合对油松生态林林木生长的影响

张听雨¹, 彭祚登^{1*}, 贾素苹², 贾建学², 于凌霄²

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 北京市大兴区林业工作站, 北京 102600)

摘要:为减少油松定植后的死亡率,在控制成本的基础上促进油松良好生长,该研究采用裂区实验设计方法,选取三个灌溉水平与三个园林废弃物有机肥施用量进行比较试验,通过测定油松树高、胸径、叶绿素及叶片养分含量指标探究灌溉和施用有机肥对油松林木生长的影响。结果表明:灌溉可以显著提高油松在胸径、树高、生理等方面的生长指标,树高和胸径在中水灌溉(A2)下的促进效果甚至高于高水灌溉(A3);试验处理1 a后,施肥对油松的生长影响显著,但三个施肥水平间的差异不显著;灌溉与施用有机肥之间不存在显著交互作用。综上可知,施肥和灌溉对油松的生长会产生显著的促进作用,从施肥和灌溉的效果并综合资源利用效率的角度考虑,少量施用有机肥,并以 $80\text{ L}\cdot(10\text{ 天}\cdot\text{株}\cdot\text{次})^{-1}$ 的灌水量在生长季(4月—9月)进行滴灌是较为经济、有效的油松生态林管护措施。

关键词:油松, 灌溉, 施肥, 林木生长

中图分类号: Q945.1 文献标识码: A

文章编号: 1000-3142(2020)06-0836-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of water fertilizer coupling on the growth of *Pinus tabulaeformis* ecological forest

ZHANG Tingyu¹, PENG Zuodeng^{1*}, JIA Suping², JIA Jianxue², YU Lingxiao²

(1. College of forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Daxing Forestry Workstation, Beijing 102600, China)

Abstract: In order to explore the effects of irrigation and application of organic fertilizer on the growth of *Pinus tabulaeformis* after planting on the basis of cost control. The split area experiment design method was adopted in this study. Three irrigation levels and three application amounts of organic fertilizer of garden waste were selected for comparative experiment. The effects of different treatments on the growth of *P. tabulaeformis* forest were studied by measuring the height, DBH, chlorophyll and leaf nutrient content indexes of *P. tabulaeformis* forest. The results were as follows: Ir-

收稿日期: 2020-04-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0600503);北京市大兴区平原生态林建设及管护综合技术研究及推广项目(2016HXFWCXY037)[Supported by the National Key R & D Program of China(2017YFD0600503);Comprehensive Technology Research and Extension Project of Plain Ecological Forest Construction and Management in Daxing District of Beijing(2016HXFWCXY037)].

作者简介: 张听雨(1993-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,从事大径阶苗木培育管理技术等研究,(E-mail) 2659000426@qq.com.

*通信作者: 彭祚登,博士,副教授,主要从事苗木培育方面的研究,(E-mail) zuodeng@sina.com.

rigation can significantly improve the growth index of *P. tabulaeformis* in DBH, tree height, physiology and other aspects, and the promotion effect of tree height and DBH under medium amount irrigation (A2) is even higher than that under high amount irrigation (A3); After one year of experimental treatment, fertilization had a significant effect on the growth of *P. tabulaeformis*, but there was no significant differences among the three fertilization levels; There was no significant interaction between irrigation and organic fertilizer application. Fertilization and irrigation can significantly promote the growth of *P. tabulaeformis*. From the perspective of the effect of fertilization and comprehensive consideration of resource utilization efficiency, it is an economic and effective management and protection measure for *P. tabulaeformis* ecological forest to apply a small amount of organic fertilizer and drip irrigation in the growing season (April to September) with the amount of $80 \text{ L} \cdot (10 \text{ d} \cdot \text{plant} \cdot \text{time})^{-1}$.

Key words: *Pinus tabuliformis*, irrigation, fertilization, tree growth

油松 (*Pinus tabuliformis*) 具有耐低温、干旱和贫瘠的特点,是我国北方温性针叶林中分布最广的森林群落,也是北京平原造林工程中使用最广的树种之一,但是,由于北京平原造林多采用大苗移栽,苗木定植后会出现了死亡、长势较差、松梢螟等问题,且水分、肥料间具有交互作用(宋修超等,2019)。因此,研究水肥耦合效应不仅可以在实践中提高水分与肥料的利用效率,而且还对改善生态环境具有重要的实际意义(陈培培等,2019)。据统计,从1960年到2008年,氮、磷和钾肥料由全球消耗量的3 000万吨增长到1.7亿吨。大量使用肥料尤其是化肥已经使全球的土壤地下水硝酸盐浓度显著增加(Marinov & Marinov, 2014)。早期研究发现水分的充足与否与肥料的施用量之间存在很大的相关性(Marinov & Marinov, 1999),Aron(1975)最早研究关于在干旱地区控制灌溉水平下的合理施肥。大量研究表明不同的灌溉、施肥水平可能会对植物的生长发育产生协同、拮抗或叠加的不同效应,因此会对植物生理生态以及生长状况都产生不同的影响,合理的灌溉对养分的利用速率与肥效间存在协同作用,提高灌溉量能显著增加氮肥的矿化速率和植物对氮的固定速率(Praetjje et al., 1994)。而合理施肥会影响土壤与植物间的水分热力学函数—偏摩尔自由能梯度,促进水分利用效率(Jones et al., 2003)。对于植物生长来说,施肥对干旱胁迫下的植物具有补偿作用,通过降低植物的水势,增加了深层土壤水分上移的动力(Barraclough, 1989),缓解缺水造成的生理功能障碍,从而提高

抗旱性,促进植物健康生长。但是,由于施肥会显著促进植物的生长,尤其是叶片,如果灌溉量较小,会加剧植物受到的水分胁迫,水肥间的交互作用可能不只是协同,还会有拮抗作用(Yadav et al., 1998)。目前,关于水肥耦合的研究主要关注于三方面:一是植物功能性状对不同水肥耦合处理的响应研究,主要集中在光合作用和蒸腾作用等方面;二是水肥对于土壤肥力的影响以及如何促进植物对土壤养分的吸收、转化和利用,有效协调植物与土壤的关系,实现养分高效利用;三是水肥对作物产品质量、数量以及品质的影响(喻阳华等,2019)。水肥一体化技术已经在我国农业生产领域得到了较为广泛的应用(高鹏等,2012)。但在林业尤其是大径阶苗木的培育管理上,鲜见相关报道。

近年来,对于生态林的施肥研究逐渐从化学肥料转向有机肥、污泥肥等具有生态保护意义的肥料,其原因:一方面是出于成本与环境的考虑;另一方面是无机肥虽然对植物生长的促进效果显著,但是只适用于短期补充,在持续改良土壤理化性质方面效果不佳,不利于大径阶苗木的持续养分供应(张宝娟等,2015)。施用有机肥的土壤与施用化肥相比,能提高水分利用效率并为节约水资源提供良好的土壤条件(王小林,2016),而适宜的灌溉水平会减少土壤养分的流失(Shang et al., 2016)。对城市生态林而言,园林废弃物堆肥生产的有机肥是经济有效、丰富便捷的肥料资源。然而,相关应用研究却十分缺乏(王成等,2017),尤其是针对油松大苗造林后采用灌溉和施用有机肥耦合的效果研究更是空白。该研究旨在探究不同

水肥配合处理水平对北京地区平原沙地生态油松林形态指标与生理指标的影响,为现阶段北京平原造林工程探索出经济、有效的生态林管护策略以及提供有价值的科学依据。

1 试验地概况

试验地位于北京市大兴区永定河畔,地理位置为 $116^{\circ}14'19.88''$ E、 $39^{\circ}36'47.01''$ N。属于暖温带半湿润大陆季风气候,年平均气温 12°C ,年平均降水量 556 mm 。

试验地的土壤质地为沙土,pH 值为 8.8,有机质含量为 $4.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 N 含量为 $0.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效 P 含量为 $13.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效 K 含量为 $11.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解 N 含量为 $59.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,容积含水量为 26.5% ,总孔隙度为 54.1% ,容重为 $1.25\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,饱和含水量 39.19% 。根据北京市土壤养分指标评分标准对该试验的土壤情况进行评价,该试验地的各项指标,除有效磷外均较低。土壤分层情况不明显,通透性较好,保水保肥能力较差,缺氮、少磷、少钾。浅层地下水位为 $8\sim 10\text{ m}$,植物生长所需水分主要依靠灌溉。

2 材料与方 法

2.1 试验材料

研究对象为大兴区油松大苗,试验所选用的北京市园林科学研究院利用园林有机肥作为试验材料,有机肥为园林绿化废弃物经堆肥处理后所制成的。该肥料有机质的质量分数为 52% ,总养分的质量分数为 6% ,水分的质量分数为 5% ,酸碱度为 7.5 。灌溉水为地下水。

油松大苗于 2013 年定植,株行距为 $4\text{ m}\times 5\text{ m}$,栽植行为东西走向。2016 年—2017 年不对油松进行修枝处理。2016 年末油松的平均胸径为 6.62 cm ,平均冠幅为 2.5 m 。该试验地的油松苗木存在少量的松梢螟病虫害,长势较为一致。

2.2 研究方法

采用裂区设计,主处理为灌溉量(A),副处理为施肥量(B)。其中灌溉处理分为 $40\text{ L}\cdot(10$

$\text{天}\cdot\text{株}\cdot\text{次})^{-1}$ 、 $80\text{ L}\cdot(10\text{ 天}\cdot\text{株}\cdot\text{次})^{-1}$ (A2)、 $120\text{ L}\cdot(10\text{ 天}\cdot\text{株}\cdot\text{次})^{-1}$ (A3),施肥处理分为 $5\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$ (B1)、 $15\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$ (B2)、 $25\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$ (B3),空白对照不进行施肥、灌溉。试验进行 3 次重复,每个处理苗木数量不少于 20 株。详见表 1。

表 1 试验梯度设计

Table 1 Test processing gradient

B 有机肥施入量 Application amount of organic fertilizer	A 主处理 Main treatment 灌溉额度 Irrigation quota		
	A1 40 L · (10 d · plant · time) ⁻¹	A2 80 L · (10 d · plant · time) ⁻¹	A3 120 L · (10 d · plant · time) ⁻¹
B1;5 kg · plant ⁻¹	A1B1	A2B1	A3B1
B2;15 kg · plant ⁻¹	A1B2	A2B2	A3B2
B3;25 kg · plant ⁻¹	A1B3	A2B3	A3B3

施肥于 3 月初进行,在生长季(4 月—9 月)进行灌溉,每 10 d 灌溉一次,每次单株灌水量为 40、80、120 L(后文简称低水、中水、高水处理)。施肥方式为距树 1.2 m 远,深度 20 cm 的地方进行环施。灌溉采用节水灌溉的方式进行滴灌,滴灌设施的铺设与调试于 2017 年 3 月末完成。

2.3 监测指标与数据采集

2.3.1 形态指标 第一次数据调查于 2017 年 2 月结束,第二次测定时间是 2018 年底。生长指标包括树高、胸径、冠幅、新枝长、顶梢长。其中树高使用激光测距仪进行测定,胸径于第一次测定时喷漆标记,第二次于相同位置测定。新枝长取东南西北四个方向主枝的当年生长量,第二次测定的是第一次所选枝条的第二年生长量。

2.3.2 叶绿素含量 叶片叶绿素测定:首先用 80% 的丙酮和 95% 的乙醇 $1:1$ 混合成 20 mL 的混合液浸泡 0.2 g 的叶片;然后测定 663、646、470 三个波长的吸光值;最后通过相应公式计算叶绿素 a、叶绿素 b、胡萝卜素的含量。

2.3.3 叶片养分含量 植物叶片的全 N 含量测定使用自动定氮仪法,全 K 含量的测定使用火焰光度计法,全 P 的测定使用钼锑抗比色法。

2.4 数据处理与分析

所有数据均使用 SPSS 16 和 Microsoft Office Excel 等统计软件进行分析。其中,显著性采用方差分析进行检验($P < 0.05$),多重比较采用邓肯氏(Duncan)新复极差测验法。

3 结果与分析

3.1 水肥处理对油松生长的影响

由表 2 可知,施肥、灌溉对树高、胸径、新枝生长的促进作用都较为显著,树高的交互作用显著,胸径、新枝长的交互作用不显著。

由图 1 可知,处理组中油松的树高、胸径、新枝长的增长量与空白对照的增长量有显著差异。在低水(A1)处理下,三个施肥水平的树高增长量均较小,中水(A2)的增长量均高于低水(A1),但是高水(A3)的增长量与中水(A2)没有显著差异。三个施肥水平中,中肥(B2)与高肥(B3)的增长率没有显著差异,低肥(B1)的增长率最高。灌溉施肥对胸径的影响与树高的相似,中水(A2)处理的增长率最高,且高水(A3)与低水(A1)的增长率没有显著差异。在三个施肥水平中,中肥(B2)对胸径增长率的促进作用最为显著,高肥(B3)与低肥(B1)的增长率没有显著差异。

新枝长的增长率在三个施肥水平下,高水(A3)的增长率最高,中水(A2)高于低水(A1)。高水(A3)处理下的中肥(A3B2)的增长率最高,低水(A1)与中水(A2)处理下的低肥(A1B1、A2B1)的增长率最高。

3.2 水肥处理对油松叶片叶绿素含量的影响

由表 2 可知,水肥交互作用不显著($a/b: P = 0.974$)。由图 2 可知,各指标表现为处理结果均显著高于对照组,但各个处理之间的含量差异不显著。叶绿素 a 和类胡萝卜素在中水(A2)处理下含量略高于低水(A1),但高水(A3)处理下与中水(A2)相比基本没有提高。

各个处理下的叶片叶绿素 b 含量均高于对照组,但是与对照组没有显著差异。叶绿素 a/b 的值在处理和对照组之间具有极显著差异。中水(A2)具有较高的叶绿素 a/b 值。

3.3 水肥处理对油松叶片养分含量的影响

由图 3 可知,对照组叶片养分含量与处理组差异显著,交互作用不显著。但园林有机肥对叶片的不同养分含量的影响作用各不相同。不同施肥水平对叶片全 N、全 K 含量的影响差异不显著,且各个施肥水平下的三个灌溉水平对叶片全 N 的影响差异不显著,中水中肥(A2B2)的促进效果较好,低肥(B1)对叶片全 P 的促进作用最差。总体来说,仍是低水中肥(A1B2)效果较好。水肥处理后叶片 N、P 的比值有所下降,且与对照组存在显著差异。三个施肥水平下比值差异不显著($P = 0.102$),三个灌溉水平下比值存在显著性差异($P = 0.009$)。

4 讨论

除树高外,油松各个方面的生长影响交互作用均不显著,但是水肥两个因素处理后的油松生长与对照组相比均存在显著的增长。

4.1 对油松形态生长的影响

根据施肥结果来看,高肥与中肥都不能显著提高油松的生长速率,但施用有机肥和灌溉措施会对周围土壤的养分含量产生较为显著的促进作用。这可能是由于试验时间过短,而油松的生长速度较慢,所以在一年的时间内三个施肥水平间没有显著差异,且试验地的土壤 pH 值较大,达到了 8.8,土壤中的养分无法被油松有效利用(孙向阳,2004)。土壤 pH 限制了油松对养分的吸收,即使施肥也不会对油松的生长起到极显著的促进作用。

分析油松生长、生理指标,发现高水或中水处理下的促进效果显著,但是高水与中水处理结果间的差异不显著。油松树高、胸径的结果都显示出高水处理结果低于中水。一方面,是由于 pH 会因灌溉而减小(梁运江等,2011),高水处理下土壤的碱性变小,有利于油松吸收土壤中的养分,从而更有效地促进了油松的生长,但对油松林中土壤 pH 进行监测发现水肥处理下的土壤 pH 值减少有限,只能一定程度上减少 pH 对养分吸收的抑制作用。另一方面,中水和高水处理间的结果差异

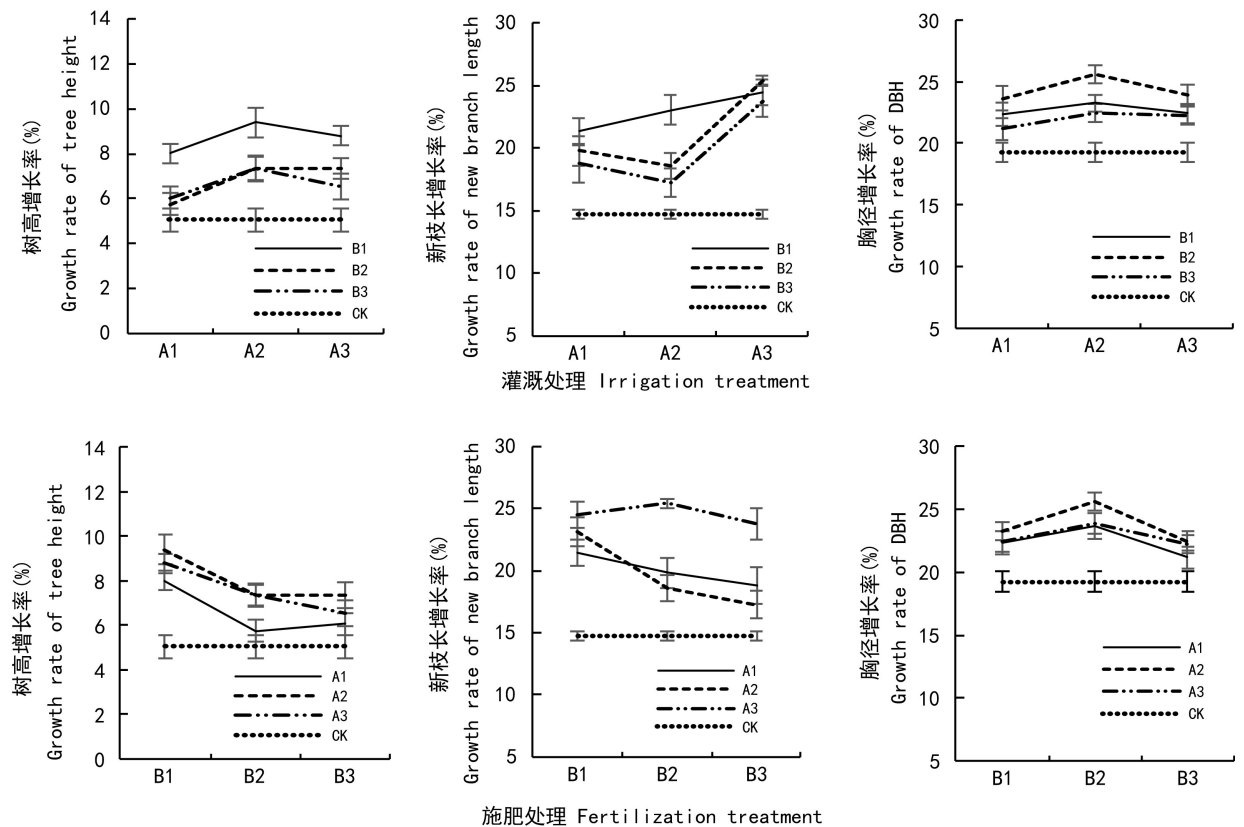
表 2 油松生长指标双因素方差分析的 P 值Table 2 P values of two factors ANOVA about the growth indexes of *Pinus tabulaeformis*

指标 Index	树高 Height	胸径 DBH	冠幅 Crown	新枝长 New branch length	叶绿素 a Chlorophyll a
灌溉 * 施肥 Irrigation * fertilization	0.001 ***	0.026	0.255	0.350	0.933
灌溉处理 Irrigation treatment	0.000 *	0.119	0.001 **	0.000	0.583
施肥处理 Fertilization treatment	0.002	0.162	0.011 *	0.427	0.171

指标 Index	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	叶片全 N Leaf nitrogen	叶片全 P Leaf phosphorus	叶片全 K Leaf potassium
灌溉 * 施肥 Irrigation * fertilization	0.996	0.993	0.449	0.445	0.772
灌溉处理 Irrigation treatment	0.947	0.243	0.049	0.924	0.026
施肥处理 Fertilization treatment	0.964	0.830	0.608	0.973	0.846

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$ 。

Note: * means $P < 0.05$; ** means $P < 0.01$; *** means $P < 0.001$.



CK. 对照(不施肥和不灌溉)。A1. 低水灌溉; A2. 中水灌溉; A3. 高水灌溉。B1. 低肥; B2. 中肥; B3. 高肥。下同。

CK. Control(No fertilization and no irrigation). A1. Low amount irrigation; A2. Medium amount irrigation; A3. High amount irrigation.

B1. Low fertilization; B2. Medium fertilization; B3. High fertilization. The same below.

图 1 水肥处理对油松生长的影响

Fig. 1 Effects of irrigation and fertilization treatments on the growth of *Pinus tabulaeformis*

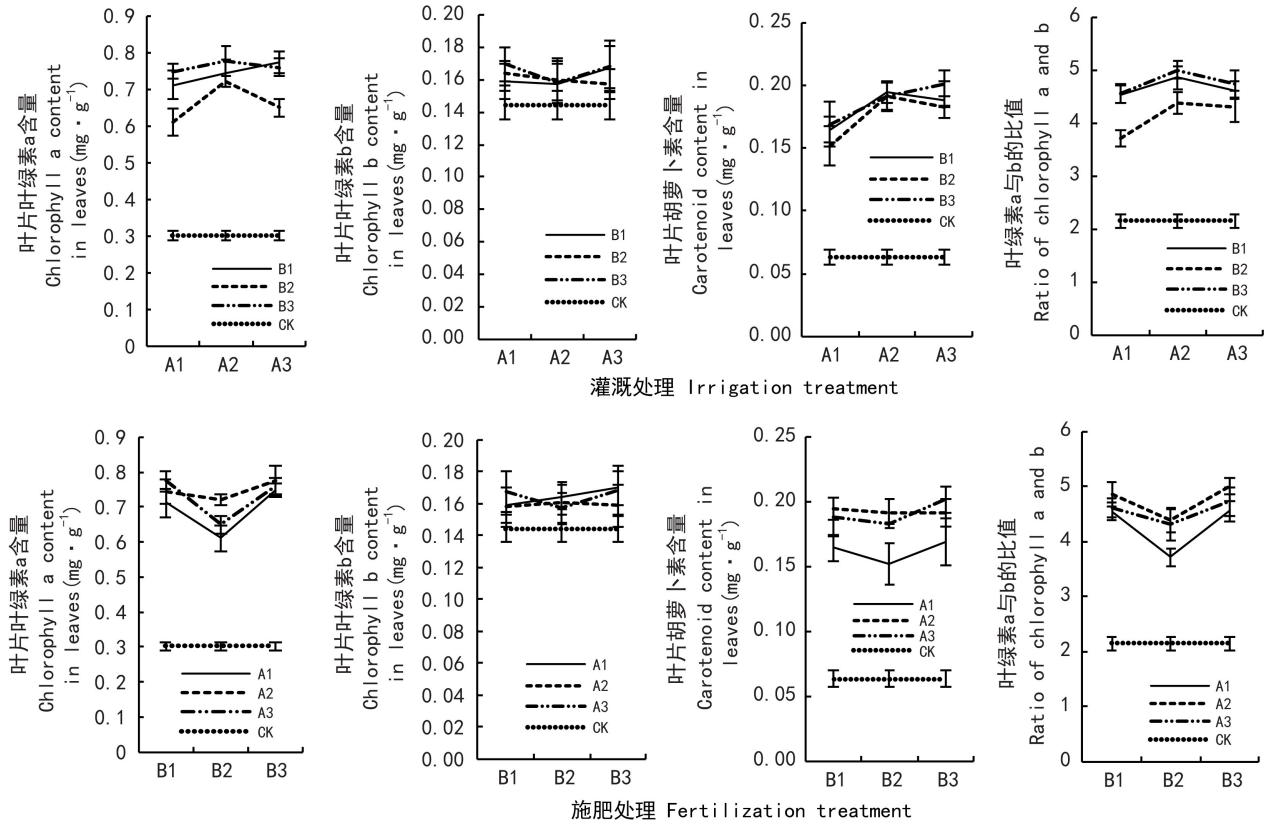


图2 水肥处理对油松叶片叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of irrigation and fertilization treatments on chlorophyll content in leaves of *Pinus tabulaeformis*

不显著,可能是由于该示范区的土壤为沙土,沙地保水能力较差(周黄磊和黄升谋,2017),降水后,很快就会渗入地下。对油松进行灌溉,可有效改善水分条件,显著提高油松各个方面的生长量,但油松的最小生态需水量较少(刘淑明等,2004),无需对油松进行高水灌溉就可以得到较好的生长增量。由此可知在该文设计的三个施肥水平下,中水灌溉量已经足够供给油松生长所需,最主要是减小油松林地的土壤pH值。

韩培义和董文旭(2019)对油松喷施含腐植酸水溶肥料与喷清水比较:一是提高了油松抗病性,发病率较对照平均降低6.5个百分点;二是明显促进了油松的生长。这与本实验的结论相同,施肥、灌溉会对油松的形态指标产生了显著的促进作用。

4.2 对油松叶片生理指标的影响

王虎兵等(2018)研究发现,低水胁迫下,增加施肥量可利于植株进行光反应。本研究发现低水

处理下,增加施肥量会提高叶片的叶绿素含量,低水高肥处理下油松的叶绿素a、b含量均高于低水低肥处理,与王虎兵等(2018)的结果一致。

刘明占等(2013)对水肥调控下胡枝子的叶绿素含量变化进行研究发现随着灌水量和磷肥的增加,叶绿素含量持续升高,而随着施氮量的增加,其含量均先升高后降低。但本研究表明过高的灌溉也不会对叶绿素的含量产生更为显著的促进作用,这很有可能是由于土壤有效养分在土壤水分含量较高的情况下发生了转移,虽然结果高于对照组,但是在达到一定灌水量后,增加水量已无法增加根系周围有效养分的浓度了。而刘明占的试验地点是西北沙地,灌水量并未达到这个峰值。

4.3 叶片养分含量

水肥管理可以引起植物体内养分含量的变化,不仅会促进一部分养分含量的增加,还会引起部分养分含量的减少(李亚东等,1997;韩世健等,2010)。叶片养分的计量特征能够一定程度上反

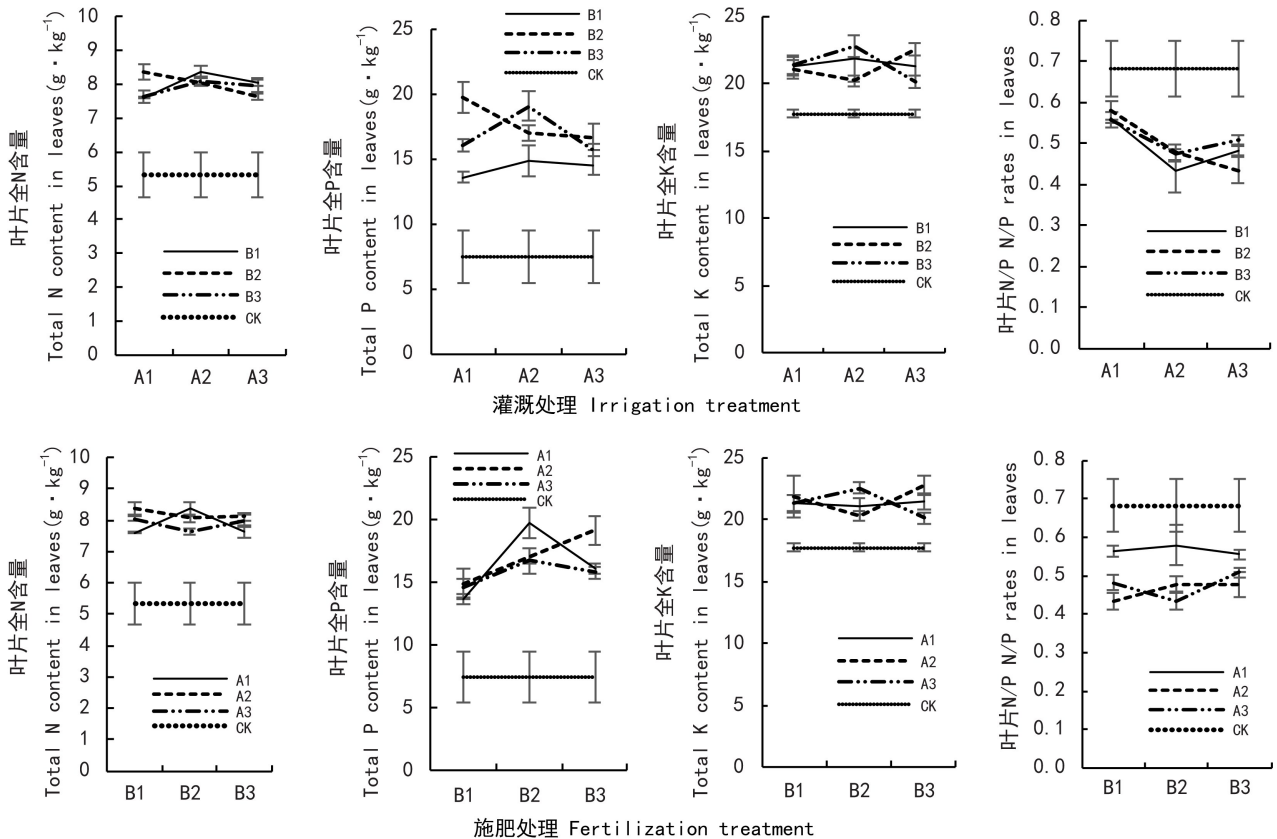


图3 水肥处理对油松叶片养分含量的影响

Fig. 3 Effect of irrigation and fertilization treatments on nutrient content of leaves of *Pinus tabulaeformis*

应植物对养分的利用策略和养分之间的关系 (Koerselman, 1996; Zhang et al., 2003; 贺金生和韩兴国, 2010)。吴海兰 (2014) 研究了不同水肥处理后红枣叶片养分的影响。本研究水肥处理后油松叶片的 N、P 比值显著低于对照组, 这与吴海兰的研究结果不一致。N、P 比值小于 14, 说明处于 N 抑制的情况, 且试验后油松生长受到 N 元素抑制的情况加剧了 (Koerselman, 1996)。这说明今后在该地区施肥时, 在施用有机肥的同时可以适当补充氮肥, 或使用氮元素含量较高的有机肥。

总体来说, 水肥处理一年后对植物生长来说, 交互作用不显著, 但水肥处理会对植物生长、生理指标产生促进作用。但考虑到资源利用效率, 建议在进行生态林管护中, 少量施用有机肥, 并以 $80 \text{ L} \cdot (10 \text{ 天} \cdot \text{株} \cdot \text{次})^{-1}$ 的灌水量在生长季 (4 月—9 月) 进行滴灌是较为经济、有效的油松生态林管护措施。

参考文献:

- ARNON I, 1975. Physiological principles of dry and crop production [A]. In: Gupta US. Physiological aspects of dryland farming [C]. N Y: University Press: 3-124.
- BARRACLOUGH PB, 1989. Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop [J]. *Plant Soil*, 119(1).
- CHEN PP, YANG QQ, HOU JB, et al., 2019. Exploring the effect of water and fertilizer regulation on the growth of *Robinia pseudoacacia* plantation [J]. *Agric Technol*, 39(9): 84-86 [陈培培, 杨倩倩, 侯金波, 等, 2019. 探究水肥调控对刺槐人工林生长的影响 [J]. *农业与技术*, 39(9): 84-86.]
- GAO P, JIAN HZ, WEI Y, et al., 2012. Application status and development prospect of water fertilizer integration technology [J]. *Mod Agric Sci Technol*, (8):250. [高鹏, 简红忠, 魏样, 等, 2012. 水肥一体化技术的应用现状与发展前景 [J]. *现代农业科技*, (8):250.]
- HAN PY, DONG WX, 2019. Effect of humic acid containing

- water-soluble fertilizer on the growth of *Pinus tabulaeformis* [J]. Bull Agric Sci Technol, (11):111-112. [韩培义, 董文旭, 2019. 含腐植酸水溶肥对油松生长的影响 [J]. 农业科技通讯, (11):111-112.]
- HAN SJ, LU GY, JIANG MM, et al., 2010. Effect of water phosphorus coupling on NPK content of sugarcane leaves [J]. Guangxi Agric Sci, 41 (9): 938-942. [韩世健, 陆国盈, 蒋明明, 等, 2010. 水磷耦合对甘蔗叶片 NPK 含量的影响 [J]. 广西农业科学, 41(9):938-942.]
- HE JS, HAN XG, 2010. Ecological chemometrics: Exploring the theory of unity from individual to ecosystem [J]. J Plant Ecol, 34 (1): 2-6. [贺金生, 韩兴国, 2010. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论 [J]. 植物生态学报, 34(1): 2-6.]
- JONES JW, HOOGENBOOM G, PORTER CH, et al., 2003. The DSSAT cropping system model [J]. Eur J Agron, 18: 235-265.
- KOERSELMAN W, 1996. The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. J Appl Ecol, 33: 1441-145.
- LI YD, WU L, ZHANG ZD, et al., 1997. Effects of N, NP, NPK fertilizer application on the growth, yield and leaf element content of bilberry [J]. Jilin Agric Sci, (3): 69-72. [李亚东, 吴林, 张志东, 等, 1997. 土壤施 N、NP、NPK 肥对越桔生长、产量及叶片元素含量的影响 [J]. 吉林农业科学, (3):69-72.]
- LIANG YJ, XU GB, XIE XH, et al., 2011. Effect of water and fertilizer treatment on soil pH value of pepper protected land [J]. Prog Water Conserv Hydrop Sci Technol, 31(2): 50-52. [梁运江, 许广波, 谢修鸿, 等, 2011. 水肥处理对辣椒保护地土壤 pH 值的影响 [J]. 水利水电科技进展, 31(2):50-52.]
- LIU MZ, CHEN ZL, TANG FD, 2013. Effect of water and fertilizer regulation on chlorophyll content of *Lespedeza* in Northwest Liaoning sandy land [J]. Liaoning For Sci Technol, (3): 1-2. [刘明占, 陈忠林, 唐凤德, 2013. 水肥调控对辽西北沙地胡枝子叶绿素含量的影响 [J]. 辽宁林业科技, (3):1-2.]
- LIU SM, SUN CZ, SUN BY, 2004. Study on suitable irrigation quota of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* plantation [J]. For Sci, (6): 85-90. [刘淑明, 孙长忠, 孙丙寅, 2004. 油松和侧柏人工林适宜灌溉定额的研究 [J]. 林业科学, (6):85-90.]
- MARINOV I, MARINOV AM, 1999. A coupled mathematical model to predict the influence of nitrogen on AR A [J]. Nitrogen Accumulation Seed Yield Water Use Three, (20): 1-3.
- National Soil Census Office, 1998. Chinese soil [M]. Beijing: China Agricultural Press:356. [全国土壤普查办公室, 1998. 中国土壤 [M]. 北京:中国农业出版社:356.]
- PRAEHTJE, NIEKELL CD, HARPER JE, et al., 1994. Agronomic evaluation of no-nodulating and hypemodulating mutants of soybean [J]. Crop Sci, 34(3): 738-739
- SHANG FZ, REN SM, YANG PL, et al., 2016. Effects of different irrigation water types, N fertilizer types, and soil moisture contents on N₂O emissions and N fertilizer transformations in soils [J]. Water Air Soil Pollut, 227:225
- SONG XC, QIU MH, GUO DJ, et al., 2019. Effects of water and fertilizer treatment on growth, water use efficiency and photosynthetic characteristics of watermelon cultivated in substrate [J]. Soil, 51 (2): 284-289. [宋修超, 仇美华, 郭德杰, 等, 2019. 水肥处理对基质栽培西瓜生长、水分利用效率及光合特性的影响 [J]. 土壤, 51(2): 284-289.]
- SUN XY, 2004. Pedology [M]. Beijing: China Forestry Press: 217. [孙向阳, 2004. 土壤学 [M]. 北京:中国林业出版社:217.]
- WANG C, JIA BQ, JIA GF, et al., 2017. Study on the effect and development strategy of afforestation in Beijing plain [J]. Urban For Chin, 15(6): 6-11. [王成, 贾宝全, 鄧光发, 等, 2017. 北京平原造林的成效与发展对策研究 [J]. 中国城市林业, 15(6):6-11.]
- WANG HB, CAO HX, HAO SX, et al., 2018. Effect of water and fertilizer coupling on growth and chlorophyll fluorescence parameters of greenhouse tomato [J]. J Drain Irrig Mech Eng, 36(10): 1047-1052. [王虎兵, 曹红霞, 郝舒雪, 等, 2018. 水肥耦合对温室番茄生长和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 36(10):1047-1052.]
- WANG SQ, LI X, XU FA, et al., 2001. Effects of long-term application of chemical fertilizer and organic fertilizer on physical properties of tidal soil [J]. Chin J Eco-Agric, 9 (2): 81-82. [王慎强, 李欣, 徐富安, 等, 2001. 长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响 [J]. 中国生态农业学报, 9(2):81-82.]
- WANG XL, 2019. Physiological basis of density and organic fertilizer to improve water use efficiency of film mulched spring maize [D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soiland Water Conservation and Ecological Environment of Ministry of Education). [王小林, 2016. 密度和有机肥提高覆膜春玉米水分利用效率的生理基础 [D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心).]
- WU HL, 2014. The effect of water and fertilizer integration on the nutrient dynamics, quality and yield of jujube leaves

- [D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University of Science and Technology. [吴海兰, 2014. 水肥一体化对红枣叶片营养动态及品质和产量的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- YADAV RS, SHARWAR I, PANDEY UK, et al., 1998. Effect of various water potential treatment on nitrate reductase activity in wheat genotypes [J]. *Agric Sci Dig*, 18(2): 72–79.
- YANG SH, XIAO YA, XU IZ, 2018. Organic fertilizer application increases the soil respiration and net ecosystem carbon dioxide absorption of paddy fields under water-saving irrigation [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 25: 9958–9968
- YU YH, WANG Y, ZHONG XP, 2019. Current situation and prospect of water and fertilizer coupling research in plantation [J]. *World For Res*, 32 (2): 35–39. [喻阳华, 王颖, 钟欣平, 2019. 人工林水肥耦合研究现状及展望 [J]. *世界林业研究*, 32(2):35–39.]
- ZHANG BJ, GUO SS, LI JQ, et al., 2015. Effects of soil mixing and fertilization on physical and chemical properties of iron tailings matrix and growth of *Pinus tabulaeformis* and *Pinus sylvestris* seedlings [J]. *For Sci*, 51(5): 12–20. [张宝娟, 郭耸松, 李继泉, 等, 2015. 掺土和施肥对铁尾矿基质理化性质及油松、樟子松幼苗生长的影响 [J]. *林业科学*, 51(5):12–20.]
- ZHANG LX, BAI YF, HAN XG, 2003. Application of N : P stoichiometry to ecology studies [J]. *Acta Bot Sin*, 45(9): 1009–1018.
- ZHOU HL, HUANG SM, 2017. Effect of sink source relationship on chlorophyll content and photosynthetic characteristics rice [J]. *J Green Sci Technol*, 24: 147–149. [周黄磊, 黄升谋, 2017. 库源关系对水稻叶绿素含量及叶绿素 a/b 值的影响 [J]. *绿色科技*, 24:147–149.]

(责任编辑 周翠鸣)