

红壤侵蚀退化地马尾松幼苗生长及养分利用效率对施肥的响应

毛兰花^{1,3}, 查 轩^{1,2,3}, 张 婧^{1,3}, 陈世发⁴

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.福建师范大学地理研究所,福州 350007;
3.湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室,福州 350007;4.韶关学院旅游与地理学院,福建 韶关 512005)

摘要: 马尾松是南方红壤侵蚀区的先锋树种,由于受土壤贫瘠的限制,植物生长缓慢。以树龄 1 年的马尾松为研究对象,研究了不同施肥处理对马尾松的生长特征以及生物量、植株养分含量和养分利用效率的影响。设置了 1 个对照(不施肥,CK)和 3 种施肥方式:单施复合肥(0.94,1.89,3.56 g);复合肥与微生物菌肥混施((0.94+8.00),(1.89+8.00),(3.56+8.00) g);复合肥与保水剂混施((0.94+1.01),(1.89+1.01),(3.56+1.01) g),为期 2 年。结果表明:(1)与对照处理相比,不同施肥处理显著提高了马尾松的地径生长量和株高生长量,地径生长量、株高生长量最高均为 F2B(复合肥与保水剂混施,(1.89+1.01) g)处理,显著高于其他施肥处理;(2)与其他施肥处理相比,复合肥与微生物菌肥混施处理下马尾松的根生物量占总生物量的比重较大,而复合肥与保水剂混施处理下其总生物量最大;(3)施肥处理显著提高了马尾松叶、茎、根的 TN、TP、TK 含量和养分利用效率,TP 含量对其生长特性影响最大,呈极显著相关,其解释了生长特性变化的 58.03%($P<0.01$);(4)主成分分析表明,F2B((1.89+1.01) g)施肥处理综合排名第 1,为试验条件下最适宜的施肥量和方法。综合马尾松的生长特征和养分利用效率分析,复合肥与保水剂混施((1.89+1.01) g)为该区域马尾松生长更为有效的施肥方法,为严重侵蚀退化马尾松林地施肥管理提供了理论依据。

关键词: 侵蚀退化地; 马尾松; 施肥处理; 保水剂; 养分利用效率

中图分类号: S157.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0316-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.040

Response of *Pinus massoniana* Seedling Growth and Fertilizer Uptake Efficiency to Fertilization in Eroded and Degraded Red Soil Regions of Southern China

MAO Lanhua^{1,3}, ZHA Xuan^{1,2,3}, ZHANG Jing^{1,3}, CHEN Shifa⁴

(1.School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2.Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3.Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fuzhou 350007; 4.College of Tourism and Geography, Shaoguan University, Fujian, Shaoguan 512005)

Abstract: *Pinus massoniana* is the pioneer tree species in the red soil regions of southern China, however, its growth is impaired by the poor soil fertility. This study examined the effects of compound fertilizer, microbial fertilizer and super absorbent polymer (SAP) on the growth characteristics, biomass, plant nutrient content, and fertilizer uptake efficiency (FUE) of 1-year-old *Pinus massoniana* seedlings. A control (no fertilizer, CK) and three fertilization treatments, namely single application of compound fertilizer (0.94, 1.89, 3.56 g); mixed application of compound fertilizer and microbial fertilizer ((0.94+8.00), (1.89+8.00), (3.56+8.00) g); and mixed application of compound fertilizer and SAP ((0.94+1.01), (1.89+1.01), (3.56+1.01) g), were applied over 2 years. The results showed that: (1) Compared to the control, different fertilization treatments significantly increased the ground diameter and plant height growth of seedlings. The highest growth of seedling ground diameter and plant height were both F2B (mixed application of compound fertilizer and SAP, (1.89 + 1.01) g) treatments, which was significantly higher than other treatments. (2) Under the mixed application of compound fertilizer and microbial fertilizer, root biomass accounted for a larger proportion of the whole biomass. Meanwhile, under the mixed application of compound fertilizer and

SAP, the whole biomass of the seedlings was higher. (3) Fertilization significantly increased the TN, TP, TK contents of leaves, stems, and roots of the seedlings. The TP content of seedlings had the greatest impact on its growth characteristics and is extremely significantly correlated, which explains 58.03% of the changes in seedling growth characteristics ($P < 0.01$). (4) Principal component analysis indicated that the F2B ((1.89+1.01) g) was the optimum fertilization amount and method in this experiment. Comprehensive analysis of growth characteristics and FUE of the seedlings showed that the F2B ((1.89+1.01) g) might serve as a highly effective fertilization method for *Pinus massoniana* growing in the severely eroded and degraded red soils of southern China. These results provide a theoretical basis for the fertilization management of *Pinus massoniana* forests with severely eroded and degraded red soils.

Keywords: eroded and degraded soil; *Pinus massoniana*; fertilization treatments; super absorbent polymers; fertilizer uptake efficiency

土壤侵蚀是指土壤在外力的作用下被破坏、分离、搬运与沉积的过程,也称水土流失^[1]。土壤侵蚀导致土壤养分流失,土壤结构破坏,引发土壤化学元素的迁移,降低土壤养分,进而对植被生长产生负效应^[2]。全球土壤侵蚀面积约为 $1.64 \times 10^7 \text{ km}^2$,占地表总面积 10.95%^[3]。中国是全球土壤侵蚀最为严峻的国家之一,据我国第二次土壤侵蚀遥感调查^[4]显示,中国土壤侵蚀面积高达 $3.56 \times 10^6 \text{ km}^2$,占国土总面积的 37.42%,其中黄土高原地区、南方红壤区与西南石漠化地区土壤侵蚀最为严重。南方红壤区的总面积约为 $1.18 \times 10^6 \text{ km}^2$,其土壤侵蚀面积高达 $1.66 \times 10^5 \text{ km}^2$,仅次于黄土高原区^[5]。南方红壤区以低山丘陵为主,地形起伏较大,土壤类型多样,抗蚀能力弱,降水集中且多暴雨,降雨侵蚀力大,富含养分的表土层遭冲刷,土壤肥力差^[5]。

福建省长汀县为南方红壤区土壤强度侵蚀区的典型代表^[6],治理历程长久,成效较显著。孙佳佳等^[7]研究植被叶面积与土壤侵蚀的关系发现,马尾松林的郁闭度能够减少土壤侵蚀,增强保持水土的能力;谢锦升等^[8]、马志阳等^[9]、毛兰花等^[10]研究发现,严重侵蚀退化地的植被恢复显著提高土壤养分,对养分循环具有促进作用。赵颖^[11]在研究长汀红壤退化区生态恢复中发现,土壤养分和水分的流失使马尾松的生境恶化,马尾松的生长一直维持在较低的水平,生长缓慢,被称为“小老头松”。已有研究^[12-13]表明,针对南方红壤区侵蚀退化地的生态恢复,首先是进行植被恢复,通过植被恢复带动植被群落的养分循环,以提高土壤肥力和改善土壤结构。植被恢复是防治水土流失最直接、有效的措施。

马尾松作为防治南方红壤侵蚀的先锋树种,对南方红壤区的生态恢复起到至关重要的作用^[14],但随着经济的发展,对木材的需求量增加,马尾松作为我国南方的经济树种,不合理的开发利用和经营措施,导致了马尾松林的地力逐年衰退,致使马尾松生长缓

慢,生产力也开始呈下降趋势^[15]。为了提高马尾松林的速生丰产,施肥则成了行之有效的途径之一。因此,本研究通过对树龄 1 年的马尾松进行单施复合肥、复合肥与微生物菌肥混施、复合肥与保水剂混施处理,主要目标是分析马尾松的生长特征、生物量分配、养分吸收和养分利用效率对不同施肥处理的响应,以期揭示哪种施肥处理对马尾松的生长更优,力求在提高马尾松生长的同时促进马尾松林地群落结构和养分循环,降低土壤侵蚀。本研究主要内容为:(1)分析不同处理对马尾松的生长特性以及养分含量的影响和彼此相互之间的关系;(2)利用植物养分含量计算不同施肥下马尾松养分利用效率,分析其变化趋势;(3)采用主成分分析,综合分析施肥对马尾松各指标的影响,确定适宜施肥量和方法。本研究结果将为南方红壤侵蚀退化马尾松林施肥管理提供有效的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为南方典型红壤区长汀县河田镇罗地 ($25^{\circ}18'40''-26^{\circ}02'05''\text{N}$, $116^{\circ}00'45''-116^{\circ}39'20''\text{E}$) 马尾松林下 0—50 cm 深的土壤,据遥感调查^[5]显示,土壤侵蚀模数平均每年达 $5\,000 \sim 12\,000 \text{ t/km}^2$,严重降低土壤养分,为长汀县严重侵蚀退化地。风干后的土壤过 1 cm 筛,去除土砾,放置于上口直径为 48 cm,底部直径为 35 cm,高为 40 cm 的塑料盆里,每个塑料盆装置 15 kg 的土。土壤基本理化性质:土壤含水量 10.76%,土壤 C 含量 1.55 g/kg, TN 含量 0.32 g/kg, P 含量 0.02 g/kg, AP 含量 0.000 4 g/kg, K 含量 1.12 g/kg。2018 年 3 月 2 日选取株高相近、地径相仿的树龄 1 年的马尾松种植,株高初始值为 $(16.74 \pm 2.35) \text{ cm}$,地径初始值为 $(1.84 \pm 0.26) \text{ mm}$ 。1 个月后,待其完全适应生长环境,测量其株高、地径,选取株高、地径相近的马尾松进行施肥试验。肥料包括复合肥(衢州农德汇化肥科技有限公司, N:P:K 为 16:5:10)、微生物菌肥(中国林业科学研究院菌根

研究开发中心,主要成分为菌丝和载体,菌种为彩色豆马勃,载体为无机物)、沃特土壤保水剂(北京汉力森公司,白色小颗粒,粒径为 0.5 mm,吸水倍率为 275.88)。本试验除施肥因素以外,其他所有条件均一致,每 7 天浇 1 次水。

1.2 试验方法

本试验分为 3 组:第 1 组为单施复合肥试验,共设 3 个梯度,6 个重复;第 2 组为复合肥与微生物菌肥混施,共设 3 个梯度,6 个重复;第 3 组为复合肥与保水剂混施,共设 3 个梯度,6 个重复;以及 1 个对照,6 个重复(表 1)。本盆栽试验施肥方案的确定是根据陈宜木^[16]研究结果以及团队做过相关试验来确定施肥量。

表 1 试验方案			
施肥措施	复合肥/g	微生物菌肥/g	保水剂/g
CK	0	0	0
F1	0.94	0	0
F2	1.89	0	0
F3	3.56	0	0
F1J	0.94	8	0
F2J	1.89	8	0
F3J	3.56	8	0
F1B	0.94	0	1.01
F2B	1.89	0	1.01
F3B	3.56	0	1.01

1.3 测定指标

每月定期测定马尾松株高、地径。于 2019 年 9 月 15 日,从每个处理中选取 5 个重复的马尾松树苗,并整盆取出置于水中,轻轻抖动使根系中的土脱落避免破坏根系。根系洗干净之后带回实验室,将马尾松的根、茎、叶分类,测其鲜重。随后将马尾松的根、茎、叶分别放置信封袋中,烘干(置于 105 ℃ 的烘箱里杀青 1 h,之后调至 65 ℃ 烘干至恒重),测其干重。烘干

后的根、茎、叶被磨碎,测定其营养成分。植物的 N 含量使用德国 Vario EL III 元素分析仪进行测定,采用连续流动分析仪(Skalar SAN++, 荷兰)测定 P 含量,用 FP640 火焰光度计测定 K 含量。植物的养分利用效率 FUE(%)计算公式^[17]为:

FUE= (N_F - N_U) / F_N × 100 %

式中: N_F 为施肥后植株的养分(N、P 或 K)含量(mg/g); N_U 为不施肥(CK)植株的养分(TN、TP、TK)含量(mg/g); F_N 为肥料(N、P 或 K)含量(g)。

1.4 数据分析

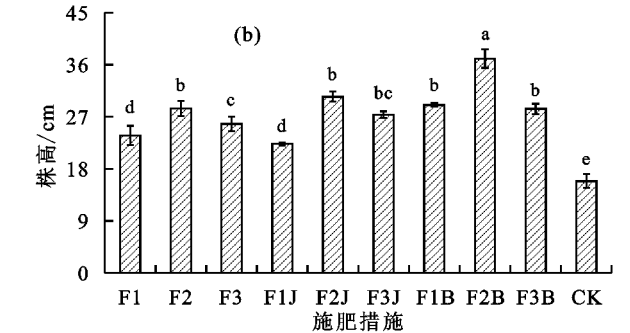
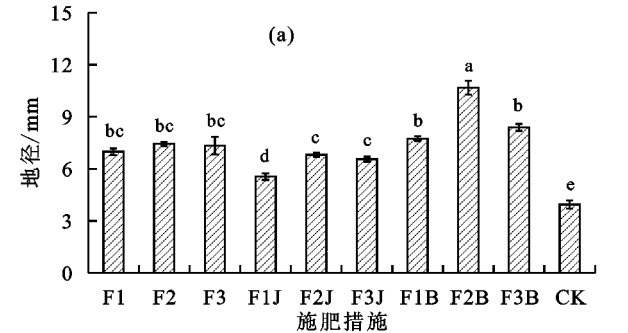
利用 IBM SPSS 19.0 统计软件,采用单因素方差分析对马尾松的生长特性、生物量、养分含量和养分利用效率进行了分析。利用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(RDA),探讨生长量与植物养分之间的关系。利用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件进行 PCA 分析,综合评价不同施肥处理对马尾松生长的影响。

2 结果与分析

2.1 马尾松生长特性对施肥的响应

施肥处理显著提高了马尾松的地径生长量(图 1a)。不同施肥处理下马尾松地径生长量的范围为 5.56~10.68 mm,显著高于对照(3.95 mm)。方差分析表明,不同施肥处理中,F2B 处理地径生长量最高,且显著高于其他施肥处理。F1J 的地径生长量最少,显著低于其他施肥处理。

施肥也显著提高了马尾松株高生长量。不同施肥处理株高生长量的变化范围为 22.32~37.07 cm,显著高于对照(15.90 cm)。F2B 处理下的株高生长量显著高于其他施肥处理,F2 的株高生长量显著高于 F1、F3,而 F2J、F3J 处理下的株高生长量显著高于 F1J(图 1b)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间显著性差异(P<0.05)。下同。

图 1 不同施肥处理对马尾松地径、株高生长的影响

不同施肥处理下马尾松地径、株高月生长量不同(表 2)。马尾松在施肥前生长缓慢,生长量较低。而施肥 1 个月后,马尾松地径、株高月生长量较高,且地径月生长量最大的为 5 月,株高月生长量最大的为 6、7 月(表 2)。

相比其他施肥处理,复合肥与保水剂混施下马尾松在 2018 年 12 月至 2019 年 2 月生长量较高,这可能是保水剂传导地热能力强,缓解了温差对马尾松生长的不利影响,同时提高了马尾松对养分的吸收,促进马尾松生长^[18]。

表 2 不同施肥处理下马尾松的地径、株高月生长量

指标	时间(年—月)	CK	F1	F2	F3	F1J	F2J	F3J	F1B	F2B	F3B
地径生长量/ mm	2018—04	0.25	0.34	0.45	0.30	0.43	0.60	0.41	0.31	0.30	0.35
	2018—05	0.35	0.75	0.59	0.58	0.54	0.67	0.46	0.73	0.92	0.48
	2018—06	0.28	0.46	0.24	0.52	0.12	0.12	0.45	0.14	0.27	0.41
	2018—07	0.53	0.20	0.39	0.23	0.55	0.34	0.47	0.88	0.44	0.75
	2018—08	0.42	0.35	0.40	0.28	0.41	0.57	0.10	0.50	0.59	0.60
	2018—09	0.50	0.64	0.43	0.58	0.34	0.13	0.65	0.41	0.42	0.12
	2018—10	0.64	0.61	0.63	0.59	0.29	0.58	0.14	0.51	0.67	0.98
	2018—11	0.17	0.06	0.21	0.09	0.06	0.13	0.16	0.50	0.17	0.29
	2018—12	0.07	0.20	0.30	0.21	0.02	0.19	0.20	0.34	0.32	0.18
	2019—01	0.17	0.18	0.11	0.11	0.08	0.07	0.11	0.35	0.38	0.16
	2019—02	0.14	0.26	0.26	0.18	0.16	0.26	0.25	0.15	0.57	0.54
	2019—03	0.42	0.37	0.45	0.92	0.11	0.47	0.52	0.39	0.79	0.54
	2019—04	0.14	0.14	0.11	0.12	0.12	0.24	0.28	0.61	0.23	0.40
	2019—05	0.25	0.85	0.86	1.01	0.54	0.84	0.60	0.65	1.25	0.68
	2019—06	0.14	0.70	0.68	0.55	0.46	0.42	0.50	0.63	0.64	0.61
	2019—07	0.21	0.15	0.35	0.19	0.42	0.71	0.55	0.23	0.47	0.80
	2019—08	0.41	0.72	1.09	0.88	0.89	0.51	0.78	0.11	1.03	0.83
	2018—04	0.40	0.77	0.97	0.97	0.70	2.30	0.95	0.50	0.85	0.75
	2018—05	2.27	2.80	3.07	3.97	3.45	3.80	3.68	4.55	4.70	4.35
	2018—06	3.20	4.40	4.73	5.03	3.50	4.30	4.05	3.75	5.21	4.25
	2018—07	3.47	4.07	4.63	3.93	3.55	4.70	3.58	4.40	4.25	4.05
	2018—08	1.97	1.47	1.90	1.80	1.75	2.50	1.85	2.65	3.90	2.10
	2018—09	0.60	0.80	1.07	0.65	0.75	3.20	0.97	1.30	2.05	1.03
	2018—10	0.63	0.67	0.73	0.67	0.65	0.79	0.67	0.70	0.83	0.76
	2018—11	0.13	0.43	0.40	0.21	0.20	0.40	0.16	0.17	0.52	0.65
	2018—12	0.03	0.33	0.32	0.24	0.45	0.30	0.27	0.30	0.40	0.30
株高生长量/ cm	2019—01	0.07	0.37	0.10	0.17	0.15	0.37	0.38	0.30	0.35	0.25
	2019—02	0.17	0.13	0.10	0.07	0.10	0.33	0.08	0.43	0.65	0.40
	2019—03	0.50	0.37	0.18	0.27	0.35	0.63	0.35	0.48	1.52	0.40
	2019—04	0.10	0.53	0.63	0.20	0.55	0.78	1.05	0.93	1.83	0.80
	2019—05	0.43	1.10	2.00	0.60	0.77	1.09	1.90	1.78	2.22	2.45
	2019—06	0.47	2.23	3.43	1.73	1.55	1.10	2.80	2.40	3.68	2.78
	2019—07	0.50	1.40	2.17	2.67	2.70	1.60	2.48	2.62	3.10	1.70
	2019—08	0.97	1.93	2.00	2.60	1.15	2.30	2.15	1.20	2.60	1.55

2.2 马尾松生物量对施肥的响应

由图 2 可知,施肥显著提高了马尾松的生物量。施肥处理下马尾松的根生物量范围为 7.24~9.46 g,显著高于 CK。根生物量最大的为 F3J,是 CK 处理的 2.27 倍,显著高于 CK。单施复合肥处理、复合肥与保水剂混施处理下的根生物量不随着施肥量的增加而增加,但复合肥与微生物菌肥混施下的根生物量随着施肥量的增加而增加。相对于其他施肥处理,复合肥与微生物菌肥混施对根生物量有一定的提高,但与其他施肥处理无显著差异。

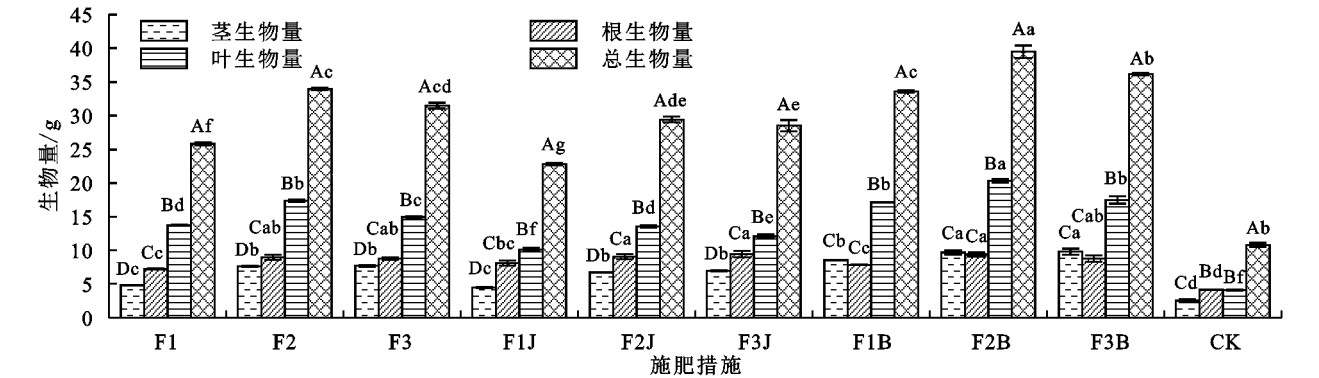
3 种施肥方式下马尾松的茎生物量随着施肥量的增加而增加。施肥处理下的茎生物量变化范围为 4.53~9.83 g,显著高于 CK 的 2.53 g。茎生物量最大的为 F3B,除了与 F2B 无显著差异,显著高于其他处理。施肥处理下的叶生物量显著增加,均显著高于 CK。3 种

施肥方式下的叶生物量并不随着施肥量的增加而增加,其表现形式分别为 F2B>F3B>F1B,F2J>F3J>F1J,F2>F3>F1。F2B 的叶生物量是最大的,显著高于其他施肥处理。与单施复合肥处理、复合肥与保水剂混施处理 2 种施肥方式相比,复合肥与微生物菌肥混施下的叶生物量是最少的,说明复合肥与微生物菌肥混施对提高马尾松叶片生物量的作用相对较弱的。

施肥处理下马尾松的总生物量范围为 22.80~38.85 g,是 CK 处理的 2 倍,表现形式为 F2B>F3B>F1B>F2>F3>F2J>F3J>F1>F1J>CK。总生物量最多的是 F2B,是 CK 的 3.58 倍,且显著高于其他施肥处理($P<0.05$)。施肥处理下,马尾松的根、茎、叶生物量占总生物量的比重有很大的差异。单施复合肥处理、复合肥与微生物菌肥混施处理下马尾松的根、茎、叶生物量的均表现为叶生物量>根生物量>茎生物

量,根、茎、叶生物量之间均存在显著差异。复合肥与保水剂混施处理下马尾松的根、茎、叶生物量均表现形式为叶生物量>茎生物量>根生物量,叶生物量显著高于

根生物量与茎生物量。而 CK 处理下马尾松的根、茎、叶生物量的均表现形式为根生物量>叶生物量>茎生物量,根生物量、叶生物量显著高于茎生物量。



注:图柱上方不同大写字母表示不同处理间根生物量、茎生物量、叶生物量、总生物量差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同施肥处理之间显著性差异($P<0.05$)。下同。

图 2 不同施肥处理对马尾松生物量的影响

对不同施肥处理下马尾松生长量与生物量进行 Pearson 相关性分析(表 3)表明,马尾松生长量与生物量存在极显著或显著的相关性。

之间呈极显著相关($P<0.01$),叶生物量与茎生物量、根生物量、总生物量之间呈极显著相关($P<0.01$),茎生物量、根生物量与总生物量之间呈极显著相关($P<0.01$)。

地径生长量与株高生长量、叶生物量、茎生物量

表 3 马尾松生长量与生物量之间相关性分析

指标	地径生长量	株高生长量	叶生物量	茎生物量	根生物量	总生物量
地径生长量	1.000	0.947**	0.894**	0.900**	0.726*	0.839*
株高生长量		1.000	0.857*	0.868*	0.783*	0.750*
叶生物量			1.000	0.896**	0.880**	0.987**
茎生物量				1.000	0.825*	0.949**
根生物量					1.000	0.891**
总生物量						1.000

注:**表示 $P<0.01$; *表示 $P<0.05$ 。

2.3 马尾松养分分配对施肥的响应

由图 3 可知,施肥处理显著提高了马尾松叶、茎、根的 TN 含量,显著高于 CK,但叶、茎、根的 TN 含量并不是随着施肥量的增加而增加。针叶的 TN 含量最高的为 F2B,显著高于其他处理除了 F2J。茎的 TN 含量最高的为 F2B,显著高于除了 F2 的其他处理;TN 含量最低的为 F1,显著低于除了 F1J 的其他处理。根的 TN 含量最高的为 F2B,显著高于除了 F2、F2J、F3B 的其他处理;F2 显著高于 F1 与 F3,F2J 与 F1J、F3J 无显著差异。相同施肥水平下,针叶中的 TN 含量显著高于根、茎的 TN 含量,茎的 TN 含量显著高于根 TN 含量。

其他处理,F1 的 TP 含量显著低于 F2 与 F3,F1J 的 TP 含量显著低于 F2J、F3J。

相同施肥水平下,与叶、茎、根的 N 含量变化趋势一样,叶、茎、根中 TP 含量表现为叶>茎>根。不同施肥方式下,针叶中 TP 含量最大的为 F2B,除了 F2J 与 F3B,显著高于其他的处理,F1 的 TP 含量显著低于 F2 与 F3,F1J 的 TP 含量显著低于 F2J、F3J。在茎中,F2B 的 TP 含量显著高于除了 F2、F2J、F3B 其他处理(图 3b)。在根中,F2B 的 TP 含量显著高于

相同施肥水平下,幼苗叶、茎、根的 TK 含量除了 F2J、F3J 表现为根>叶>茎,和除了 F1B 表现为茎>叶>根,均表现为叶>茎>根。F2B 的叶、茎、根的 TK 含量均为最高的。在叶中,F2B 的 TK 含量显著高于其他处理;F1 的 TK 含量显著低于显著低于 F2 与 F3,F1J 的 TK 含量显著低于 F2J、F3J。在茎中,F2 的 TK 含量显著高于 F1 与 F3;F2J 的 TK 含量略高于 F1J 与 F3J,无显著差异;F2B 的 TK 含量显著高于 F1B,与 F3B 无显著差异。在根中,F2B 的 TK 含量显著高于其他处理除了 F2J 与 F3J;F1 的 TK 含量显著低于 F2 与 F3,F1J 的 K 含量显著低于 F2J、F3J。总体上,马尾松幼苗 TN、TP、TK 含量表现叶>茎>根,而叶、茎、根的营养含量表现为 TN>TK>TP。

由图 4 可知,RDA1 和 RDA2 分别解释了变量的 73.10%和 2.02%,说明了马尾松幼苗养分含量是影响植物生长特性的关键因子。马尾松幼苗的 TP 含量对生长特性影响最大,呈极显著相关,其解释了幼

苗生长特性变化的 58.03% ($P<0.01$), 其次为幼苗 TN 含量, 解释了幼苗生长变化的 10.30%。

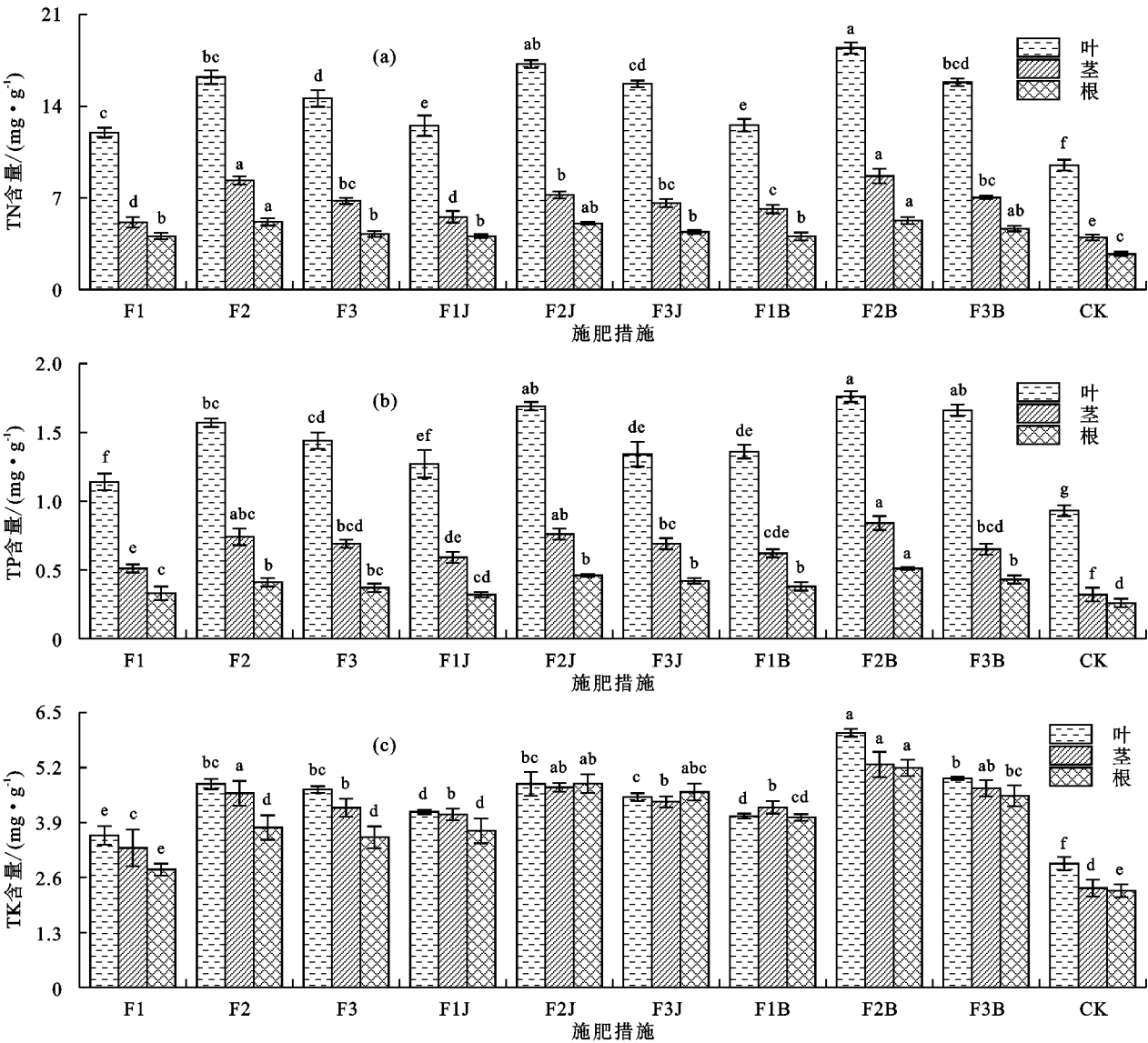
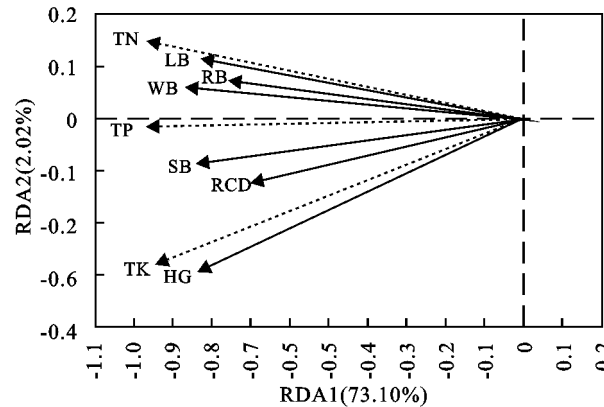


图 3 不同施肥处理下马尾松幼苗 N、P、K 养分含量分配

2.4 马尾松养分利用效率对施肥的响应

由表 4 可知, 施肥对幼苗的 TN 利用效率 (NUE) 具有显著的影响作用 ($P=0$)。不同施肥处理下的马尾松幼苗对养分的利用效率不同, 并不随着施肥量的增加而增强。单施复合肥处理下, NUE 最高的为 F2, 是 F1 的 1.35 倍和 F3 的 2.71 倍; 复合肥与菌肥混施处理下, F1J 与 F2J 的 NUE 显著高于 F3J, 分别是 F3J 的 2.14, 2.37 倍; 复合肥与保水剂混施处理下, F2B 的 NUE 是最高的, 是 F1B 的 1.22 倍和 F3B 的 2.70 倍。幼苗 P 养分利用效率 (PUE) 同样受施肥处理的影响 ($P=0$)。F1 与 F2 的 PUE 分别是 F3 的 1.82, 2.29 倍; 同样, F1J 与 F2J 的 PUE 分别是 F3J 的 2.66, 2.78 倍。幼苗 PUE 最大的为 F2B, 除了 F1B, 显著高于其他施肥处理。施肥对幼苗的 K 养分利用效率 (KUE) 也有显著的影响 ($P=0$)。F2 的 KUE 分别是 F1、F3 的 1.45, 2.17 倍。F1J 的 KUE 分别大于 F2J 的 20% 以及是 F3J 的 2.59 倍。

在所有的施肥处理中, F2B 的 KUE 最高, 除了 F1J、F1B, 显著高于其他处理。



注: HG 为株高生长量; RCD 为地径生长量; LB 为叶生物量; SB 为茎生物量; RB 为根生物量; WB 为总生物量。

图 4 马尾松幼苗生长特性与养分含量的 RDA 排序

2.5 综合分析

由图 5 可知, 对不同施肥处理下马尾松生长特

性、生物量、养分含量以及养分利用效率进行主成分分析(PCA)表明,PCA1 和 PCA2 分别解释了各变量间的 53.20%和 26.70%。马尾松 TP、TK 与 PCA1 呈极显著相关关系;NUE、PUE、KUE 与 PCA1、PCA2 均呈显著相关,说明养分利用效率在植被生长过程中起着重要作用。

表 4 不同施肥处理对马尾松幼苗养分吸收效率的影响

单位: %

施肥措施	TN	TP	TK
F1	33.13±3.81c	10.17±1.75de	19.38±1.47de
F2	44.74±0.47ab	12.75±1.23cd	28.11±3.56cd
F3	16.52±1.35d	5.57±0.60f	12.95±1.28e
F1J	39.61±7.57bc	14.18±1.28bc	41.06±4.16ab
F2J	43.92±1.72ab	14.87±0.71bc	34.33±3.13bc
F3J	18.50±1.17d	5.33±0.30f	15.84±0.61e
F1B	43.64±4.83abc	16.96±1.63ab	45.57±2.47a
F2B	53.54±3.36a	18.22±0.89a	47.40±1.97a
F3B	19.84±0.38d	6.90±0.59ef	17.75±1.35e
P	0	0	0

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

由表 5 可知,对不同施肥处理进行主成分分析,PC1 得分系数最高的为 F2B 处理,显著高于其他处理,其次为 F3B,除了与 F2 无显著差异,显著高于 CK、

表 5 不同施肥处理主成分得分和综合得分及排名

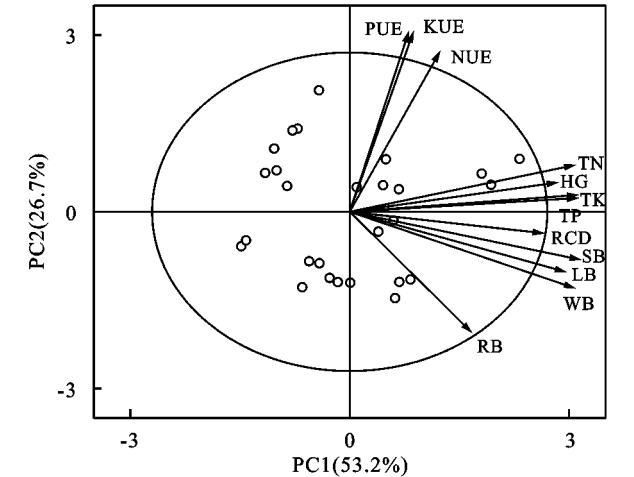
施肥措施	PC1		PC2		综合得分及排名	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名
CK	-6.61±0.21g	10	0.95±0.16bc	3	-4.76±0.19g	10
F1	-1.18±0.46ef	8	-2.39±0.43e	10	-1.48±0.25f	9
F2	2.05±0.02b	3	-1.27±0.57e	8	1.24±0.13c	3
F3	1.02±0.54c	4	-1.33±0.68e	9	0.45±0.27d	5
F1J	-1.83±0.06f	9	0.56±0.49bc	4	-1.24±0.14f	8
F2J	0.71±0.32cd	5	0.22±0.46c	5	0.59±0.13d	4
F3J	0.17±0.29d	6	-1.14±0.65de	7	-0.15±0.07e	6
F1B	-0.89±0.12e	7	1.58±0.13ab	2	-0.29±0.12e	7
F2B	4.08±0.22a	1	2.76±0.21a	1	3.76±0.21a	1
F3B	2.47±0.09b	2	0.05±0.06cd	6	1.88±0.08b	2

3 讨论

3.1 马尾松生长与生物量对施肥的响应

植物生长受到许多非生物因素的限制^[19-20],而改善限制性因素可以有效地促进植被的生长。已有研究^[20-21]表明,改善土壤肥力能够促进植物的生长,而施肥效果显著表现在植物的生长指标上,主要包括植物的地径生长量、株高生长量以及叶、茎、根生物量等。本研究中,施肥显著提高了幼苗的地径、株高生长量(图 1)以及根生物量、茎生物量、叶生物量与总生物量(图 2)。已有研究^[20-21]表明,施肥能促进幼苗的生长,但过高的施肥量对幼苗生长无显著增加,甚至可能产生负效应^[22]。本研究中 F2B 的马尾松幼苗

F1、F3、F1J、F2J、F3J、F1B,其他施肥处理显著高于 CK;PC2 的得分系数最高的为 F2B 处理,除了 F1B,显著高于其他处理。不同处理的综合得分结果表明,F2B 处理的综合得分是最高,其次为 F3B,说明复合肥与保水剂混施比较适宜马尾松的生长。



注:HG 为株高;RCD 为地径;LB 为叶生物量;SB 为茎生物量;RB 为根生物量;WB 为总生物量;TN 为全氮;TP 为全磷;TK 为全钾;NUE、PUE、KUE 分别为氮磷钾养分利用效率。

图 5 不同施肥处理下马尾松生长特性、养分含量、养分利用效率的主成分分析(PCA)

地径、株高生长量最大(图 1),而 F3、F3J、F3B 的施肥量相对过高,其中大部分的肥料可能流失到环境中。同时,与对照相比,施肥处理下马尾松的生长速率各不相同,整体上复合肥与保水剂混施对于促进地径、株高的生长效果优于其他施肥处理。在非生长季时期,施肥量较高的苗木地径、株高生长量与其他处理无显著差异,这可能是较高的施肥量抑制了苗木的生长,造成其过度吸收,对苗木的生长无效益^[22]。微生物菌肥能够改善土壤环境,促进幼苗根系的生长^[23],本研究中根生物量最大的为 F3J 处理,但除了 F1、F1J、F1B、F3J 与其他施肥处理无显著差异(图 2)。相对其他施肥处理,复合肥与微生物菌肥混施对茎生物量和叶生物量无显著提高,这可能是微生物菌

肥在早期对幼苗的生长能够起到一定的促进作用,主要是促进根系的生长,提高植株的成活率^[23]。当植物生长过程中受到养分限制时,植物产生更多的根系来适应环境,根生物量随之增加^[21],与本研究 CK 处理一样,根生物量、茎生物量、叶生物量表现为根生物量>叶生物量>茎生物量(图 2),而施肥降低了根生物量占全株生物量的比重,提高了茎生物量和叶生物量在总生物量的比例。单施复合肥处理、复合肥与微生物菌肥混施处理下马尾松幼苗的根生物量、茎生物量、叶生物量均表现为叶生物量>根生物量>茎生物量,而复合肥与保水剂混施处理下马尾松幼苗地上部分生物量显著高于地下生物量的比重(图 2),已有研究^[18,24]表明,植物在相同水肥条件下,施用 SAP 能提高土壤涵养水源能力,促进植物的 HG、RCD、茎生物量、叶生物量等地上部分指标的生长而减少根生物量。根生物量通常在营养丰富的土壤上减少,施肥可能会降低细根生物量^[22],但本研究结果与其他研究^[21]相似,显著增加了根生物量。

3.2 马尾松叶、茎、根养分分配对施肥的响应

植物本身具有结构效应,即不同组织具有自身特有的功能、生长和更替率以及生命周期策略,从而导致植物组织中营养元素的吸收量不同^[25]。不同施肥处理条件下,幼苗根、茎、叶的 TN、TP、TK 含量分配不同,施肥显著提高了马尾松针叶的 TN、TP、TK 含量,营养吸收是植物从衰老结构向其他生物组织中重新分配养分的过程,是影响植物生长的重要影响因素^[26]。土壤是植物器官营养元素的主要来源,其营养元素含量的高低与土壤养分含量密切相关,施肥能促进植物对养分的吸收,植物器官的 TN、TP、TK 含量明显增加^[27]。马尾松根、茎、叶的 TN、TP、TK 含量呈现一定的差异,本研究表明,TN、TP、TK 含量表现为叶>茎>根,其主要因为根系是植物直接吸收土壤养分的主要组织,与茎是运输植物营养元素的主要器官,而叶是植物利用营养元素的主要器官,因此叶的养分含量相对较高^[26]。与其他施肥措施相比,复合肥与保水剂混施下的马尾松叶、茎、根的 TN、TP、TK 含量相对较高,而保水剂是不含营养元素的,但保水剂自身可以吸水固土,减少可溶性营养元素的淋溶流失,达到保水保肥的效果,促进植物的养分吸收^[18]。

本研究表明,马尾松养分含量是影响植物生长特性的关键因子,而 TP 含量对其生长特性影响最大,呈极显著相关($P<0.01$),这主要是与马尾松生长的规律有关,根据马尾松自身生长速度的需求、相应合成蛋白质的累积量与马尾松的 TP 含量有关,马尾松生长速度加快,相应合成的蛋白质增加,TP 含量相应呈上升趋势^[27]。

3.3 马尾松养分利用效率对施肥的响应

有研究^[28]表明,提高土壤养分往往会减少养分吸收效率。与单施复合肥相比,复合肥与微生物菌肥混施、复合肥与保水剂混施提高了 TN、TP、TK 的吸收效率(表 4)。微生物菌肥作为土壤改良剂,可提高施肥效率^[23],复合肥与微生物菌肥混施可促进植物对肥料的吸收利用,提高作物生产力^[20]。保水剂可以提高土壤持水能力和土壤聚集性,有效保护土壤养分^[24],促进植物对养分的吸收利用。NUE 随着施肥量的增加呈先上升后下降,F2B 的 NUE 是最高的(表 4),这表明了复合肥与保水剂混施对马尾松施肥中的养分利用效率的重要性,但该地区马尾松施肥大多以单施氮、磷肥或配施氮磷肥为主^[26],这些结果表明,确定合理有效的施肥对于 N 的吸收效率至关重要。PUE 显著低于 NUE、KUE(表 4),这可能与酸性土壤中磷的吸收效率极低有关^[28],已有研究^[10,17]表明,中国南方红壤区马尾松林地土壤养分大多表现为缺磷少氮的特点。同样,KUE 比 PUE 高得多(表 4),特别是南方红壤区天然土壤中有效钾的极端缺乏^[29],促进了幼苗对肥料中 K 的吸收利用。本研究中,较高的施肥量并没有促使幼苗获得更高养分,使得肥料的利用效率较低,这表明在植物吸收能力一定的情况下,在任何时候,过度施肥超过了植物的需求,会导致更大比例的养分不被植物吸收,从而降低肥料养分的吸收效率。

3.4 综合分析

不同施肥措施的综合得分结果表明,F2B 处理的综合得分最高(表 4),说明适度的复合肥与保水剂配施可以促进马尾松的生长。施肥除了对目标树木的生长和产量产生影响外,还对人工林生态系统的许多方面产生影响。本研究结果显示,较低肥料可以产生更好的生长响应和更高的肥料利用率。因此,为了平衡人工林的生长和环境保护,应规定肥料的施用量和方法,以促进植被的养分吸收和生长生产力。

4 结论

在本试验条件下,与 CK 相比,施肥显著提高了马尾松地径、株高、生物量和养分含量。尽管复合肥与生物菌肥混施对根系生长有一定的促进作用,但与单施复合肥、复合肥与保水剂混施处理相比,对茎、叶生物量无显著的促进作用。综合分析马尾松的生长特征和养分利用效率,复合肥与保水剂混施(F2B)可能为该区的马尾松生长提供了更为有效的施肥方法。但是,本试验为盆栽试验,在一定程度上揭示了马尾松施肥效应,但在自然环境中还是有一定的差异,希望在今后可以在红壤严重侵蚀退化马尾松林地内开展施肥试验,其得出的结论更贴合当地的实际情况。

参考文献:

- [1] 陈世发. 基于 GIS 的亚热带山地土地利用与土壤侵蚀关系研究: 以粤北山区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2): 80-85.
- [2] Wu X L, Wei Y J, Wang J G, et al. Rusle erodibility of heavy-textured soils as affected by soil type, erosional degradation, and rainfall intensity: A field simulation [J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(1): 408-420.
- [3] Larsen I, Montgomery D R, Korup O. Landslide erosion controlled by hill slope material [J]. Nature Geoscience, 2010, 3(4): 247-251.
- [4] 邝高明, 刘超群, 俞国松, 等. 土壤侵蚀分类分级标准和 RUSLE 模型间的差异研究[J]. 人民珠江, 2014, 35(1): 15-18.
- [5] 胡晓倩, 李忠武, 陈佳, 等. 南方红壤丘陵区退耕还林还草工程土壤保持效应评估[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 95-100.
- [6] 朱鹤健, 陈志彪, 林惠花, 等. 长汀水土保持研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1060-1066.
- [8] 谢锦升, 林瑞余, 黄荣珍, 等. 严重侵蚀红壤不同治理模式群落 N、P 养分循环研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 16-19.
- [9] 马志阳, 查轩. 南方红壤区侵蚀退化马尾松林地生态恢复研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 188-193.
- [10] 毛兰花, 查轩, 黄少燕, 等. 乔灌木治理年限对红壤区土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 173-178.
- [11] 赵颖. 长汀红壤退化区生态恢复过程中植被—土壤系统养分动态研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2014.
- [12] Jacobs B F. Restoration of degraded transitional (piñon-juniper) woodland sites improves ecohydrologic condition and primes instory resilience to subsequent disturbance [J]. Ecohydrology, 2016, 8(8): 1417-1428.
- [13] Wang F X, Wang Z Y, Lee J H. Acceleration of vegetation succession on eroded land by reforestation in a subtropical zone [J]. Ecological Engineering, 2007, 31(4): 232-241.
- [14] Song Y, Huang Y, Jie Y. The characteristics of soil and water loss in pinus massoniana forest in quaternary red soil area of south China [J]. Iop Conference, 2017, 81(2): 120-131.
- [15] 马静. 马尾松人工林施肥效应研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [16] 陈宜木. 山茶属 3 种食用油植物苗期施肥效应研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [17] Zeng S, Jacobs D F, Sloan J L, et al. Split fertilizer application affects growth, biomass allocation, and fertilizer uptake efficiency of hybrid Eucalyptus [J]. New Forests, 2013, 44(5): 703-718.
- [18] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 控释氮肥全量基施对旱地玉米产量形成和水肥利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 170-177.
- [19] Luo J, Shi W G, Li H G, et al. The conserved salt-responsive genes in the roots of *Populus × canescens* and *Arabidopsis thaliana* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 129(SI): 48-56.
- [20] Huang X G, Liu Y F, Li Y Y, et al. Foliage application of nitrogen has less influence on soil microbial biomass and community composition than soil application of nitrogen [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 19(1): 1-11.
- [21] Tanis S R, Mccullough D G, Cregg B M. Effects of paclobutrazol and fertiliser on the physiology, growth and biomass allocation of three *Fraxinus* species [J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2015, 14(3): 590-598.
- [22] Yuan Z Y, Chen H Y H. Negative effects of fertilisation on plant nutrient resorption [J]. Ecology, 2015, 96(2): 373-380.
- [23] Aggangan N S, Anarna J A. Microbial biofertilizers and soil amendments enhanced tree growth and survival in a barren mined-out area in Marinduque, Philippines [J]. Journal of Environmental Science and Management, 2019, 22(2): 77-88.
- [24] Suresh R, Prasher S O, Patel R M, et al. Super absorbent polymer and irrigation regime effects on growth and water use efficiency of container-grown cherry tomatoes [J]. Transactions of the Asabe, 2018, 61(2): 523-531.
- [25] Deng S X, Shi K K, Ma J, et al. Effects of fertilization ratios and frequencies on the growth and nutrient uptake of *Magnolia wufengensis* (*Magnoliaceae*) [J]. Forests, 2019, 10(1): e65.
- [26] 盘金文, 郭其强, 孙学广, 等. 不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 746-756.
- [27] 向云西, 陈胜魁, 潘萍, 等. 马尾松叶片—凋落物—土壤的碳氮磷化学计量特征[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(2): 120-126.
- [28] Vergutz L, Manzoni S, Porporato A, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants [J]. Ecological Monographs, 2012, 82(2): 205-220.
- [29] Erro J, Baigorri R, Yvin J C, et al. ³¹P NMR characterization and efficiency of new types of water-insoluble phosphate fertilizers to supply plant-available phosphorus in diverse soil types [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(5): 1900-1908.