



王晗,王改萍,刘嘉俊,等.不同施肥配方对废弃矿区油用牡丹果实质量和土壤理化性状的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(5):1233-1243.

WANG H,WANG G P,LIU J J,et al.Effects of different fertilization formulas on fruit quality and soil physical and chemical properties of oil peony in abandoned mining areas[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(5):1233-1243.

不同施肥配方对废弃矿区油用牡丹果实质量和土壤理化性状的影响

王 晗,王改萍*,刘嘉俊,轩辕欣彤,王 峥

(南京林业大学 林草学院/南方现代林业协同创新中心,江苏 南京 210037)

摘要:【目的】目前,我国油用牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)种植面积逐步增大,但施肥不合理显著制约油用牡丹果实产量、品质的提高,且乱施肥会造成地力下降。探究不同施肥配比对油用牡丹果实质量、土壤性状的影响,为在废弃矿山地区合理种植油用牡丹提供理论依据。【方法】采用“3414”配方施肥法,将10年生油用牡丹按14个不同氮、磷、钾施肥配比进行施肥,分析14种不同处理下油用牡丹的果实质量、土壤理化性状之间存在的差异。【结果】不同施肥处理对果实质量、土壤性状的影响存在明显差异,适宜的氮、磷、钾施肥配比能显著改善土壤理化性状,提高油用牡丹籽实的产量、品质。在 $N_3P_2K_2$ 处理下大部分指标皆为最优,尤其是在油用牡丹籽实品质中,除种形指数外,其他指标皆为该处理最优,单株果荚数、果荚直径、种子百粒质量,较CK($N_0P_0K_0$)分别提高了106%、31%、45%;土壤全氮、碱解氮以 $N_3P_2K_2$ 处理最优,其中全氮较CK提高了62%;土壤物理性状不同处理之间有所差距,但结果差别较小;土壤脲酶、磷酸酶以 $N_3P_2K_2$ 处理最优,较CK分别提高了33%、20%,且对照组处理结果皆低于其他施肥处理。【结论】不同施肥处理能显著影响油用牡丹果实的品质以及土壤的性状,施肥效果最好的为 $N_3P_2K_2$ 处理,推荐施肥量为 $N:42.2\text{ kg/hm}^2$ 、 $P_2O_5:63.1\text{ kg/hm}^2$ 、 $K_2O:42.1\text{ kg/hm}^2$ 。

关键词:油用牡丹;产量;品质;土壤性状;废弃矿区

中图分类号:S714.8 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)05-1233-11



Effects of different fertilization formulas on fruit quality and soil physical and chemical properties of oil peony in abandoned mining areas

WANG Han, WANG Gaiping*, LIU Jiajun,
XUANYUAN Xintong, WANG Zheng

(College of Forestry and Grassland/Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

收稿日期:2023-11-08 修回日期:2024-06-25

基金项目:国家林业和草原局林业和草原科技成果国家级推广项目(2023133126)

Project supported by the National Level Promotion Project for Scientific and Technological Achievements in Forestry and Grassland of National Forestry and Grassland Administration(2023133126)

作者简介:王晗,硕士生, orcid.org/0009-0003-1774-6730, 1449863192@qq.com; *通信作者:王改萍,副教授,博士,主要从事森林培育研究, orcid.org/0000-0003-4322-906x, 905181635@qq.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Abstract: [Objective] The planting area of oil peonies (*Paonia suffruticosa* Andr.) in China is gradually increasing. However, unreasonable fertilization significantly restricts the improvement of fruit yield and quality of oil peonies, and indiscriminate fertilization can decrease soil fertility. This study aims to explore whether a reasonable fertilization ratio can improve the quality of oil peony fruit and soil properties, thus providing a theoretical basis for the rational planting of oil peony in abandoned mining areas. [Method] The “3414” formula fertilization method was used to fertilize 10-year-old oil peonies according to 14 different nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization ratios. The differences in fruit quality and soil physicochemical properties of oil peonies under 14 different treatments were analyzed. [Result] There are significant differences in the effects of different fertilization treatments on fruit quality and soil properties. Suitable nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization ratios can significantly improve soil physical and chemical properties, and increase the yield and quality of oil peony seeds. Under the $N_3P_2K_2$ treatment, most of the indicators, except for the seed shape index, are optimal, especially the quality of oil peony seeds. The number of pods per plant, pod diameter, and seed weight per 100 seeds increase by 106%, 31%, and 45%, respectively, compared with those of CK ($N_0P_0K_0$). The optimal treatment for soil total nitrogen and alkaline nitrogen was $N_3P_2K_2$, with total nitrogen increased by 62% compared with that of CK. Although there are differences in soil physical properties among different treatments, the difference is relatively small; $N_3P_2K_2$ is also the optimal treatment for soil urease and phosphatase, which increase by 33% and 20% respectively compared with that of CK, and the results of the control group treatment are lower than those of other fertilization treatments. [Conclusion] Different fertilization treatments can significantly affect the quality of oil peony fruits and soil properties. The best fertilization result is the $N_3P_2K_2$ treatment, with recommended fertilization amounts of N: 176.8 kg/hm²、P₂O₅: 63.1 kg/hm²、K₂O: 96.3 kg/hm².

Keywords: oil peony; yield; quality; soil properties; abandoned mines

【研究意义】废弃矿区多是因矿采活动完成后弃之不管或未经采后处理而形成的用地^[1]。目前我国废弃矿区面积已呈现逐渐增加的趋势^[2],废弃矿区对当地生态造成严重影响,更甚者会带来水体污染、水土流失等危害。目前废弃矿区恢复常采用覆土加补植植物^[3]。油用牡丹是原产于我国的一种优良木本油料植物,为毛茛科芍药属的多年生灌木,其中‘凤丹’是江南地区油用牡丹的主栽品种,耐干旱、瘠薄、盐碱,适应范围广^[4]。当前,我国对于油用牡丹的栽植更多还是依赖药用牡丹相关研究,常会因为施肥量或者施肥比例不同,导致油用牡丹产量降低,造成经济损失。并且在废弃矿区种植与一般环境下种植有较大差异,不能完全依靠常规栽植方法而照搬到废弃矿区的环境下。因此,为能够改善土壤质量,提高油用牡丹的经济价值,缓解当地的生态环境,选择合理的氮、磷、钾施肥配比尤为重要。【前人研究进展】“3414”测土配方施肥法目前已用于多种植物、农作物施肥优化上。王琴等^[5]得出施肥量为氮肥 90 kg/hm²、磷肥 105 kg/hm²、钾肥 60 kg/hm²时,无芒雀麦种子产量达到最高;边巴卓玛^[6]认为“3414”不同施肥处理间能显著影响苦荞籽粒产量。郑加兴等^[7]认为合理施肥配比显著增加玉米产量,并确定最佳施肥配比为 N: 176.8 kg/hm²、P₂O₅: 63.1 kg/hm²、K₂O: 96.3 kg/hm²。不同配比下的氮、磷、钾肥能提高土壤全氮、全磷含量^[8],证明合理施肥不仅提高籽实产量,还能改善土壤质量。废弃矿区土壤退化严重^[9],但合理施肥提高了土壤供肥能力^[10],且改善了土壤的理化性状^[11]。

【本研究切入点】目前,围绕废弃矿区种植油用牡丹相关研究较少,使得油用牡丹生长差异大。且土壤质量制约着油用牡丹果实品质,通过比较不同施肥处理结果,得出果实品质最高条件下的氮、磷、钾施肥量。比较土壤理化性状、酶活性的差异,分析在废弃矿区不同配比施肥对土壤质量的影响。【拟解决的关键问题】试验按照“3414”试验设计,以油用牡丹产量建立氮、磷、钾肥料效应模型,并确定合理施肥量。同时探究不同配比对油用牡丹籽实品质、土壤理化性质和土壤酶活性的影响。为在废弃矿区种植油用牡丹提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地设于江苏省无锡市宜兴市江苏万阳牡丹产业园(31°07'N,119°31'E),位于江苏省西南段、沪宁杭三角区中心。属于亚热带季风气候,年均气温约为 16.5℃;雨量充沛,年总降水量约为 1 229.9 mm,日最大降水量达到 137.1 mm,气候适宜。土壤类型为砂红土,偏酸性,适宜油用牡丹生长。试验地原为废弃宕口,2016年后经过项目改造,通过统一在矿山表面覆盖土层,使其土壤性状基本一致,同时移植 10 年生油用牡丹‘凤丹’实生苗,株行距 0.6 m×0.8 m。经检测土壤 pH 为 7.98,有机质为 12.15 g/kg,全氮为 1.06 g/kg,碱解氮为 31.97 mg/kg,有效磷为 5.82 mg/kg,速效钾为 116.81 mg/kg。

1.2 试验材料

供试材料:10 年生油用牡丹‘凤丹’。供试肥量:氮肥为尿素(含 N 46.4%),江苏晋煤恒盛化工股份有限公司;磷肥为重过磷酸钙(含 P₂O₅ 46%),郑州洁程化工产品有限公司;钾肥为硫酸钾(含 K₂O 52%),山东联盟磷复肥有限公司。

1.3 试验设计

按照“3414”施肥试验,共设 3 因素(氮、磷、钾)、4 水平(0:不施肥;1:2 水平的 0.5 倍;2:当地常用施肥量;3:2 水平的 1.5 倍)。当地常用施肥水平为每 667 m²施复合肥 15 kg(含 N15%,含 P₂O₅15%,含 K₂O15%),14 个处理的施肥量如表 1 所示,以 N₀P₀K₀作为对照处理。每个处理设 3 个重复,共 42 个小区。设小区面积为 14.4 m²(9 m×1.6 m),每小区设 30 株油用牡丹苗木,设 1 m 保护行且采取随机区组排列。肥料采用沟施,共施 2 次:于 2022 年春分前后第 1 次追肥,花谢后第 2 次追肥,两次施肥量相同。

表 1 “3414”施肥法试验方案
Tab.1 “3414” fertilization method experimental plan

处理 Treatment		施肥量/(kg·hm ⁻²) Fertilization amount			处理 Treatment		施肥量/(kg·hm ⁻²) Fertilization amount		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	8	N ₂ P ₂ K ₀	40.7	42.5	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	42.5	40.7	9	N ₂ P ₂ K ₁	40.7	42.5	20.3
3	N ₁ P ₂ K ₂	20.4	42.5	40.7	10	N ₂ P ₂ K ₃	40.7	42.5	61
4	N ₂ P ₀ K ₂	40.7	0	40.7	11	N ₃ P ₂ K ₂	61.1	42.5	40.7
5	N ₂ P ₁ K ₂	40.7	21.3	40.7	12	N ₁ P ₁ K ₂	20.4	21.3	40.7
6	N ₂ P ₂ K ₂	40.7	42.5	40.7	13	N ₁ P ₂ K ₁	20.4	42.5	20.3
7	N ₂ P ₃ K ₂	40.7	63.8	40.7	14	N ₂ P ₁ K ₁	40.7	21.3	20.3

1.4 测定项目与方 法

1.4.1 产量

果实于七月下旬成熟后,采收样品并统计产品单株果实数、果荚质量、果荚直径。称量种子百粒质量,测量种子纵径、种子横径,计算种子种形指数,并计算各处理种子产量。

1.4.2 油用牡丹籽含油率测定

应用核磁共振法测定油用牡丹籽含油率:称取样品放入烘箱干燥,直至样品含水率在 10% 以下,冷却至室温,随机称取 4~8 g(精确到 0.001 g)样品(样品量视样品籽粒大小而定),装入测定专用试管中,置于仪器测试区域,调用标准曲线测定。产油量=籽粒产量×种仁含油率。

1.4.3 肥料效应模型的建立

针对氮、磷、钾三肥的施肥效益进行拟合,并计算出最高产量和最佳产量下的施肥量。

1.4.4 土样采集

选取“S”型采样法,每个小区内设置 5 个采样点进行土样的采集,使用土钻钻取 0~20 cm 土层的土壤

放入密封袋中。带回实验室后于室温下自然风干,风干后取出碎石枯枝断根等杂质并过筛,用于土壤理化性状和酶活性的测定。

1.4.5 土壤理化性状的测定

参考《土壤农化分析》^[12],有机质测定采用重铬酸钾-外加热法、全氮测定采用凯氏法、有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法、速效钾测定采用火焰光度法、土壤pH值测定采用电位法。全磷测定采用钼锑抗比色法、全钾测定采用氢氟酸高氯酸消煮-火焰光度计测定、碱解氮测定采用扩散法。

1.4.6 土壤酶活性的测定

参考《土壤酶及其研究法》^[13],土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定,蔗糖酶采用水杨酸比色法测定,磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定。

1.5 数据整理分析

运用SPASS 20.0软件和Excel 2010进行数据的整理分析。数据结果以平均值±标准差表示($P \leq 0.5$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对油用牡丹产量的影响

对不同施肥处理下油用牡丹的籽实产量进行方差分析。如表2所示,在 $N_3P_2K_2$ 施肥处理下单株果荚数最高,除与 $N_2P_2K_3$ 、 $N_2P_2K_2$ 处理外无显著差异外,与其他施肥处理均有显著差异。 $N_0P_0K_0$ 处理除了与 $N_0P_2K_2$ 、 $N_2P_0K_2$ 、 $N_1P_1K_2$ 处理外,其均显著低于其他处理。单果荚质量以 $N_3P_2K_2$ 施肥处理下最高,以 $N_0P_0K_0$ 处理下最低且显著低于除 $N_2P_3K_2$ 处理外的其他处理。果荚直径以 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 处理显著高于 $N_0P_0K_0$ 、 $N_2P_3K_2$ 处理,其他处理间无显著差异。种子产量在 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 处理下较高且显著高于其他施肥处理, $N_0P_0K_0$ 处理下的产量最低且显著低于其他处理。种子百粒质量以 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 处理结果较高且显著高于缺素区种子百粒质量,最低的为 $N_0P_0K_0$ 处理。种子纵经、横径以 $N_3P_2K_2$ 处理显著高于 $N_0P_0K_0$ 、 $N_2P_0K_2$ 、 $N_0P_2K_2$ 、 $N_2P_3K_2$ 。种形指数间无显著差异。

表2 不同施肥处理对‘凤丹’果实品质的影响

Tab.2 Effect of different fertilization treatments on the fruit quality of ‘Fengdan’

处理 Treatment	单株果荚数 No. per pod	单果荚质量/g Pod weight	果荚直径/cm Pod diameter	种子数 Counts	百粒质量/g 100'heft	种纵径/mm Length	种横径/mm Diam	种形指数 Index
$N_0P_0K_0$	5.61 d	18.93 f	8.11 c	5 207 f	23.4 d	9.23 d	7.0 d	1.31 a
$N_0P_2K_2$	6.67 cd	25.48 cde	8.60 abc	8 325 de	27.1 cd	9.63 bcd	7.5 bcd	1.29 a
$N_1P_2K_2$	8.44 bc	29.97 abcd	9.79 abc	10 044 cd	30.7 abc	10.01 abc	8.0 abc	1.25 a
$N_2P_0K_2$	7.67 bcd	24.83 de	8.45 bc	8 232 de	26.1 cd	9.38 cd	7.2 cd	1.31 a
$N_2P_1K_2$	8.11 bc	29.82 abcd	9.99 abc	10 760 bc	31.2 abc	10.05 abc	8.2 ab	1.24 a
$N_2P_2K_2$	9.67 ab	30.66 abc	10.44 ab	12 500 ab	32.9 ab	10.16 abc	8.3 ab	1.23 a
$N_2P_3K_2$	8.49 bc	22.16 ef	8.24 c	7 053 e	28.4 bcd	9.73 bcd	7.6 abc	1.28 a
$N_2P_2K_0$	8.51 bc	26.61 cde	8.86 abc	8 453 de	28.0 bcd	9.71 bcd	7.5 bcd	1.29 a
$N_2P_2K_1$	9.00 bc	30.29 abc	10.29 ab	11 368 abc	31.6 abc	10.11 abc	8.2 ab	1.24 a
$N_2P_2K_3$	9.93 ab	32.40 ab	10.54 a	12 901 a	33.9 a	10.41 ab	8.4 ab	1.25 a
$N_3P_2K_2$	11.55 a	33.87 a	10.60 a	13 017 a	33.9 a	10.58 a	8.5 a	1.26 a
$N_1P_1K_2$	7.78 bcd	27.52 bcd	9.11 abc	8 767 de	28.5 abcd	9.78 abcd	7.8 abc	1.26 a
$N_1P_2K_1$	8.11 bc	28.72 abcd	9.48 ab	8 990 d	29.2 abc	9.90 abcd	8.0 abc	1.25a
$N_2P_1K_1$	8.06 bc	28.09 bcd	9.29 abc	8 829 de	28.7 abcd	9.89 abcd	7.8 abc	1.27a

同列不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$) between different treatments.

2.2 不同处理对油用牡丹含油量的影响

如表3所示,在不同施肥处理下,油用牡丹籽的含油率及每处理所产出的牡丹油量均有较大差异。种子的含油率以 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 处理结果较高。每处理的产油量受施肥效果影响差异较大, $N_0P_0K_0$ 处理的小区不仅产量低且种子质量差,产油量显著低于其他处理。产油量的高低随着施肥量

的多少逐渐上升,但在上升到一定程度时仍会下降, $N_0P_0K_0$ 处理显著低于其他处理,效果最好的是 $N_3P_2K_2$ 处理。

表 3 不同施肥处理对‘凤丹’种子含油率的影响

Tab.3 Effect of different fertilization treatments on the oil content of ‘fengdan’ seeds

处理 Treatment	产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Production	种子含油率/% Seed oil content	产油量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Oil production
$N_0P_0K_0$	837.23 ± 75.25^f	21.97 ± 1.56^c	183.44 ± 13.18^d
$N_0P_2K_2$	$1\ 568.00\pm 382.81^e$	22.57 ± 1.26^{bc}	352.04 ± 73.93^e
$N_1P_2K_2$	$3\ 082.39\pm 283.70^{cd}$	24.00 ± 1.00^{abc}	510.89 ± 75.35^{cd}
$N_2P_0K_2$	$2\ 126.85\pm 194.15^e$	22.04 ± 1.30^{bc}	337.81 ± 45.11^e
$N_2P_1K_2$	$2\ 297.47\pm 288.32^e$	24.27 ± 1.32^{abc}	554.19 ± 51.52^e
$N_2P_2K_2$	$2\ 830.53\pm 79.28^{ab}$	25.05 ± 0.27^{ab}	708.95 ± 21.43^{ab}
$N_2P_3K_2$	$1\ 386.93\pm 232.70^e$	23.36 ± 1.42^{bc}	326.18 ± 72.41^e
$N_2P_2K_0$	$1\ 637.70\pm 215.45^e$	22.93 ± 1.70^{bc}	374.86 ± 50.44^e
$N_2P_2K_1$	$2\ 466.16\pm 129.35^{bc}$	24.62 ± 0.63^{ab}	607.43 ± 43.69^{bc}
$N_2P_2K_3$	$3\ 001.75\pm 353.09^a$	25.16 ± 1.49^a	758.85 ± 132.39^a
$N_3P_2K_2$	$3\ 036.52\pm 215.72^a$	25.27 ± 1.24^a	766.78 ± 56.52^a
$N_1P_1K_2$	$1\ 723.54\pm 190.23^{de}$	23.42 ± 1.30^{bc}	404.77 ± 62.00^{de}
$N_1P_2K_1$	$1\ 813.42\pm 253.68^{de}$	23.60 ± 1.51^{bc}	430.58 ± 89.28^{de}
$N_2P_1K_1$	$1\ 745.73\pm 145.62^{de}$	23.53 ± 1.14^{bc}	409.83 ± 21.44^{de}

同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Different letters in the same column indicate significant differences($P<0.05$)between different treatments.

2.3 油用牡丹肥效模型分析

针对于试验中氮、磷、钾 3 种单肥对油用牡丹产量的影响分别进行一元方程拟合,可得到以下 3 个肥料效应方程:

$$N: Y=5\ 337+3\ 155.4X-300.49X^2$$

$$P: Y=116.72+9789.6X-1993.9X^2$$

$$K: Y=4544.1+4590X-628.45X^2$$

通过对氮、磷、钾肥一元方程拟合可知,氮肥以及钾肥的方程为增产型,没有达到一元二次型的要求^[14],所以氮肥、钾肥的最佳施肥量选择本试验中 N_3 、 K_3 水平。而磷肥的方程达到要求,在最高产量时, P_2O_5 的施用量为 63.1 kg/hm^2 。

2.4 不同处理对土壤物理性状的影响

由表 4 可知,不同施肥措施对土壤的物理性状具有一定程度的改善。经分析土壤含水率最高的为 $N_3P_2K_2$ 处理,其次为 $N_2P_2K_3$ 处理,二者皆显著高于 $N_0P_0K_0$ 处理,其他处理间无显著差异。土壤容重较好的为 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 处理,且显著高于 $N_0P_0K_0$ 处理。土壤孔隙度最高的为 $N_3P_2K_2$ 处理,显著高于 $N_0P_0K_0$ 处理。土壤 pH 范围为 7.89~8.06,均在适宜油用牡丹生长 pH 区间,对油用牡丹影响较小。土壤的物理性状随着施肥量的增加而得到改善,土壤容重、含水率、孔隙度对照组的各项结果皆低于其他处理。

2.5 不同处理对土壤 N、P、K 的影响

对 14 个不同施肥处理地块的 0~20 cm 土壤进行土壤氮、磷、钾的测定。由表 5 可知,土壤全氮 $N_3P_2K_2$ 处理最高,全氮 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 处理显著高于其他处理, $N_0P_0K_0$ 、 $N_0P_2K_2$ 、 $N_1P_1K_2$ 处理显著低于其他处理。土壤碱解氮以 $N_2P_2K_3$ 、 $N_3P_2K_2$ 处理结果较高,且显著高于其他处理。全磷受施肥影响较高,不同处理间差异较大,其中以 $N_2P_3K_2$ 处理结果最高, $N_0P_0K_0$ 处理结果最低。有效磷不同处理之间仍有较大的差异。 $N_2P_3K_2$ 处理显著高于其他处理, $N_0P_0K_0$ 处理显著低于其他处理。土壤全钾以 $N_2P_2K_3$ 施肥处理结果最高,显著高于其他处理。 $N_0P_0K_0$ 及 $N_2P_2K_0$ 施肥处理较差,且显著低于其他处理。土壤速效钾以 $N_2P_2K_3$ 施肥处理结果最高,显著高于其他处理。效果最差的为 $N_0P_0K_0$ 处理。

表 4 不同施肥处理对土壤物理性质的影响
Tab.4 Effects of different fertilization treatments on soil physical properties

处理 Treatment	土壤含水率/% Soil moisture content	土壤容重 Soil bulk density	孔隙度 Porosity	pH 值 pH value
N ₀ P ₀ K ₀	22.32±0.43 ^c	1.308±0.005 ^a	0.506 4±0.001 7 ^c	7.98±0.05 ^{abc}
N ₀ P ₂ K ₂	22.86±0.25 ^{abc}	1.302±0.003 ^{abc}	0.508 6±0.001 0 ^{abc}	8.03±0.03 ^{ab}
N ₁ P ₂ K ₂	23.81±0.92 ^{ab}	1.292±0.010 ^{bc}	0.512 3±0.003 6 ^{ab}	8.02±0.08 ^{ab}
N ₂ P ₀ K ₂	22.66±0.27 ^{bc}	1.304±0.003 ^{ab}	0.507 8±0.001 1 ^{bc}	8.06±0.08 ^a
N ₂ P ₁ K ₂	23.75±0.84 ^{ab}	1.293±0.009 ^{bc}	0.512 1±0.003 3 ^{ab}	7.92±0.05 ^{bc}
N ₂ P ₂ K ₂	23.96±0.39 ^{ab}	1.291±0.004 ^{bc}	0.512 9±0.001 5 ^{ab}	7.92±0.05 ^{bc}
N ₂ P ₃ K ₂	23.65±0.72 ^{ab}	1.294±0.008 ^{bc}	0.511 7±0.002 9 ^{ab}	7.98±0.04 ^{abc}
N ₂ P ₂ K ₀	22.97±0.52 ^{abc}	1.301±0.005 ^{abc}	0.509 0±0.002 1 ^{abc}	7.99±0.08 ^{abc}
N ₂ P ₂ K ₁	23.95±0.65 ^{ab}	1.291±0.007 ^{bc}	0.512 9±0.002 6 ^{ab}	7.97±0.04 ^{abc}
N ₂ P ₂ K ₃	24.09±0.74 ^a	1.290±0.008 ^c	0.513 4±0.003 0 ^a	7.89±0.06 ^c
N ₃ P ₂ K ₂	24.18±1.28 ^a	1.289±0.013 ^c	0.513 7±0.005 0 ^a	7.91±0.06 ^{bc}
N ₁ P ₁ K ₂	23.32±0.43 ^{abc}	1.297±0.005 ^{abc}	0.510 4±0.001 7 ^{abc}	8.02±0.06 ^{ab}
N ₁ P ₂ K ₁	23.46±0.65 ^{abc}	1.296±0.007 ^{abc}	0.510 9±0.002 6 ^{abc}	7.95±0.10 ^{abc}
N ₂ P ₁ K ₁	23.03±0.74 ^{abc}	1.301±0.008 ^{abc}	0.509 2±0.003 0 ^{abc}	7.89±0.09 ^c

同列不同字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$) between different treatments.

表 5 不同施肥处理对土壤 N、P、K 的影响
Tab.5 Effects of different fertilization treatments on soil N, P, and K

处理 Treatment	全氮/(g·kg ⁻¹) Total N	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Alkaline-N	全磷/(g·kg ⁻¹) Total P	有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available P	全钾/(g·kg ⁻¹) Total K	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available K
N ₀ P ₀ K ₀	1.06±0.08 ^e	31.97±7.38 ^e	0.80±0.06 ^h	5.82±1.48 ^e	18.70±0.52 ^e	116.81±0.97 ^e
N ₀ P ₂ K ₂	1.09±0.09 ^e	35.93±9.21 ^{de}	1.25±0.13 ^{ef}	13.11±0.68 ^d	22.56±0.96 ^e	132.83±5.23 ^{cd}
N ₁ P ₂ K ₂	1.22±0.07 ^d	45.03±8.65 ^{cde}	1.49±0.04 ^{cd}	14.50±1.09 ^{cd}	24.09±0.64 ^b	143.62±5.38 ^{bc}
N ₂ P ₀ K ₂	1.26±0.05 ^{cd}	49.00±7.20 ^{cd}	1.09±0.05 ^g	8.24±1.68 ^f	22.47±0.61 ^e	136.81±10.98 ^{bc}
N ₂ P ₁ K ₂	1.36±0.07 ^{ab}	56.70±6.40 ^{bc}	1.21±0.06 ^{efg}	11.02±0.86 ^e	24.25±0.59 ^b	148.48±7.52 ^b
N ₂ P ₂ K ₂	1.45±0.06 ^b	65.80±13.80 ^b	1.51±0.06 ^{cd}	14.84±0.66 ^{cd}	24.44±1.12 ^b	146.74±9.80 ^b
N ₂ P ₃ K ₂	1.38±0.07 ^{ab}	57.40±7.89 ^{bc}	1.91±0.07 ^a	21.09±2.06 ^a	22.67±1.01 ^c	140.53±5.74 ^{bc}
N ₂ P ₂ K ₀	1.32±0.07 ^{abc}	50.30±8.40 ^{bc}	1.25±0.09 ^e	13.11±0.82 ^d	18.88±0.69 ^e	118.28±5.32 ^e
N ₂ P ₂ K ₁	1.38±0.06 ^{ab}	56.70±7.67 ^{bc}	1.47±0.07 ^{cd}	14.32±1.04 ^{cd}	20.70±0.07 ^d	125.34±2.93 ^{de}
N ₂ P ₂ K ₃	1.71±0.01 ^a	101.03±9.24 ^a	1.58±0.08 ^c	16.06±0.71 ^{bc}	26.41±0.59 ^a	160.65±6.19 ^a
N ₃ P ₂ K ₂	1.72±0.01 ^a	107.43±4.37 ^a	1.72±0.04 ^b	17.10±0.82 ^b	24.50±0.70 ^b	146.05±6.57 ^b
N ₁ P ₁ K ₂	1.10±0.03 ^e	36.63±7.02 ^{de}	1.11±0.08 ^{fg}	9.64±0.54 ^{ef}	22.09±0.66 ^e	137.59±5.11 ^{bc}
N ₁ P ₂ K ₁	1.22±0.05 ^d	43.40±3.61 ^{cde}	1.42±0.10 ^d	13.28±1.05 ^d	20.37±0.55 ^d	124.27±3.64 ^{de}
N ₂ P ₁ K ₁	1.32±0.12 ^{cd}	56.00±10.14 ^{bc}	1.14±0.08 ^{efg}	10.16±1.41 ^{ef}	20.41±0.53 ^d	124.04±4.63 ^{de}

同列不同字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$) between different treatments.

2.6 不同处理对土壤生物活性的影响

由表 6 可知,不同施肥处理对土壤酶活性具有一定影响。土壤脲酶活性在 N₂P₃K₂、N₃P₂K₂ 施肥处理下效果较好, N₂P₃K₂ 处理效果最好,效果最差的为 N₀P₀K₀、N₀P₂K₂ 处理且显著低于其他处理,不同处理间脲酶活性差别较大。土壤蔗糖酶不同处理间差异也较明显,最高的为 N₃P₂K₂ 处理,并和 N₂P₃K₂ 处理显著高于除 N₂P₂K₃ 外的其他处理。土壤磷酸酶不同处理间差异较小,最高的为 N₃P₂K₂ 处理,最低的为 N₀P₀K₀,磷酸酶活性随着施氮量的上升而上升。过氧化氢酶在不同处理之间虽存在一些差异,但没有表现出与氮、磷、钾相关,最高的为 N₂P₂K₂ 处理,最低的为 N₂P₂K₃ 处理。

表 6 不同施肥处理对土壤酶活性的影响
Tab.6 Effects of different fertilization treatments on soil enzyme activity

处理 Treatment	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase	磷酸酶 Phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
N ₀ P ₀ K ₀	2.07±0.13 ^f	10.15±0.55 ^f	10.35±0.35 ^e	15.39±0.19 ^{abc}
N ₀ P ₂ K ₂	2.10±0.05 ^f	11.62±0.85 ^{ef}	10.40±0.28 ^e	15.78±0.69 ^{ab}
N ₁ P ₂ K ₂	2.35±0.03 ^{de}	25.28±2.37 ^c	11.02±0.56 ^{cd}	15.06±0.63 ^{abcd}
N ₂ P ₀ K ₂	2.45±0.06 ^{cde}	12.38±1.25 ^{ef}	11.18±0.82 ^{bcd}	15.36±0.47 ^{abc}
N ₂ P ₁ K ₂	2.49±0.08 ^{bcd}	24.29±1.87 ^c	11.31±0.29 ^{bcd}	14.45±0.19 ^{cd}
N ₂ P ₂ K ₂	2.61±0.10 ^{ab}	25.86±2.17 ^{bc}	11.63±0.60 ^{abc}	16.10±0.59 ^a
N ₂ P ₃ K ₂	2.61±0.11 ^{ab}	28.76±2.19 ^a	12.09±0.19 ^{ab}	15.84±0.55 ^{ab}
N ₂ P ₂ K ₀	2.76±0.08 ^a	11.84±0.59 ^{ef}	12.05±0.64 ^{ab}	15.77±0.67 ^{ab}
N ₂ P ₂ K ₁	2.75±0.10 ^a	25.42±0.61 ^{bc}	11.66±0.71 ^{abc}	15.99±0.93 ^{ab}
N ₂ P ₂ K ₃	2.48±0.08 ^{bcd}	27.92±1.60 ^{ab}	11.26±0.82 ^{bcd}	14.31±0.41 ^d
N ₃ P ₂ K ₂	2.76±0.05 ^a	28.47±0.79 ^a	12.37±0.56 ^a	16.03±0.56 ^a
N ₁ P ₁ K ₂	2.31±0.06 ^e	12.89±0.87 ^e	10.48±0.56 ^e	14.47±0.11 ^{cd}
N ₁ P ₂ K ₁	2.36±0.11 ^{de}	20.53±1.09 ^d	10.85±0.52 ^{cd}	14.96±0.70 ^{bcd}
N ₂ P ₁ K ₁	2.52±0.07 ^{bc}	19.11±1.19 ^d	11.13±0.21 ^{bcd}	15.76±0.71 ^{ab}

同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。
Different letters in the same column indicate significant differences($P<0.05$)between different treatments.

3 讨 论

目前,已有相关研究表明,合理施肥能促进多种植物的生长^[15-16],但不同氮、磷、钾施肥配比对油用牡丹产量及土壤的影响相关文章较少。本研究以废弃矿山地区种植油用牡丹作试验,在基肥一致的基础上通过对2次追肥进行不同处理。结果表明,氮、磷、钾三肥之间配比及施用量的不同,显著影响油用牡丹的产量及籽实的品质^[17]。随着施肥量的增加,油用牡丹产量及籽实品质都在增加^[18],且不同施肥处理间的果实产量、品质存在显著差异。其主要原因是氮、磷、钾施肥量的不同,导致之间的互作效应不同。本研究中,施肥处理显著优于对照不施肥处理,这是因为氮、磷、钾是植物生长过程中不可或缺的营养因子^[19],合理施肥能及时补充植株所需营养,为优质结实奠定良好基础。试验中施肥效果较好的为N₃P₂K₂、N₂P₂K₃处理。因为氮肥能够促进植物生长,增加植株抗性,提高产能和光合速率,磷肥在促进植物生长、提高果实品质方面也具有显著作用,钾肥能促进植物进行光合作用,激发植物体内酶活性^[20]。3种肥料缺一不可,某一肥料的缺失均会限制油用牡丹的生长^[18]。所以在N₀、P₀、K₀水平时,施肥效益皆差于其他施肥处理,而当施肥量达到N₁、P₁、K₁水平时,籽实品质明显提高,但仍没满足植物体所需的营养元素含量,施肥效益要差于2水平时的施肥量。N₃P₂K₂施肥效果大于N₂P₂K₃处理,可能是由于油用牡丹生长过程中,对氮肥的需求量要大于钾肥。在施磷肥量达到水平3时,油用牡丹的产量开始出现下降的趋势,但氮肥和钾肥达到水平3时并没有出现此种情况,其原因可能是本试验地土壤所含的磷肥量在水平3时超过了适宜油用牡丹生长所需的磷量,反而出现了抑制其生长的现象,但所含的氮肥以及钾肥仍在油用牡丹生长范围内,所以其产量及籽实品质相比对照改善效果较大,此结论在姜天华等^[15]研究中被提及。

分别对氮、磷、钾三肥进行肥效拟合,氮肥和钾肥的方程皆为增产型,在韩峰等^[14]结论中,如果肥效拟合方程为增产、非增产等形态下,可按照经验进行施肥量的确定。经分析本试验施肥量与前人探究的施肥量有所不同^[18],氮、钾的施用量低于其推荐要求,存在的原因可能是虽然本试验中所施的N₃、K₃水平为最高产量时的施肥水平,但仍然未达到传统油用牡丹的推荐施肥量。所以本研究中的氮、钾施用量低于其他地区的施用量,而磷肥相比于其他地区施肥量相似。

相关研究表明施肥可改善土壤的营养条件^[21-23],对改善土壤性状也有一定影响^[24],并且直接或间接影响着土壤的生物活性^[25]。土壤中的氮、磷、钾含量是评价土壤养分的重要指标,例如施磷肥显著提高了土壤磷含量^[26-27]。本试验得出不同施肥处理对土壤理化性状存在显著改善作用^[28],降低了土壤容重,改善了土壤结构,并且可以通过促进团聚体的形成来提高土壤孔隙度^[29]。土壤pH无显著改善作用,但14个施肥处理的土壤pH皆在油用牡丹生长范围内。随着施肥量的增加,土壤的氮、磷、钾也在不断提高,皆在 N_3 、 P_3 、 K_3 施肥水平时达到最大值。证明施肥能够促进土壤中微生物的生长,使有机物的分解效率更高,同时带动了土壤中氮、磷、钾的含量,提高土壤肥力^[30]。所以本试验中氮、磷、钾单种肥料施肥量达到最高时,土壤中氮磷钾各项指标含量高于其他处理。施肥在一定程度下影响了土壤养分的变化,氮、磷、钾3种元素间存在不同的互作效应,施肥处理要显著优于不施肥处理。因此,本试验中, $N_0P_0K_0$ 处理下土壤氮、磷、钾各项指标含量均最低,在 N_0 、 P_0 、 K_0 处理时,土壤养分含量低于其他处理,试验中碱解氮、有效磷、速效钾均呈现不同程度的变化^[31]。土壤酶活性不同处理之间存在较大差异^[32],土壤脲酶、过氧化氢酶等皆是土壤中常见的生物酶,是评价土壤质量的重要指标^[33]。脲酶能够水解尿素,与土壤的供氮能力紧密相连,本试验中脲酶含量与氮的施用量呈正相关,当施氮量于3水平时高于其他处理,不同处理间脲酶含量由高到低变化规律为 N_3 、 N_2 、 N_1 、 N_0 ,与杨宝平等^[34]结论相似。土壤蔗糖酶与土壤中易溶性营养物质的产生起重要作用,试验中蔗糖酶的含量随着施肥量的增多不断增加^[35], $N_2P_3K_2$ 施肥处理蔗糖酶含量要显著优于其他处理,一定程度上表现出土壤肥力越高蔗糖酶活性越高。土壤磷酸酶可以加速有机磷脱磷速率^[36],试验中表现为不同施肥基础上有一些差异,处理间随着施肥量的增多磷酸酶含量不断上升。由此可见,合理的施肥配比能够显著改善土壤性状^[37-39]。

目前在生产实践中培育的油用牡丹,常出现施肥不合理现象^[18],导致油用牡丹生产效益低下,造成相关环境污染。本试验通过14个氮、磷、钾肥不同施肥量的配比,研究了在废弃矿区施肥对油用牡丹籽实产量、品质,以及对土壤理化性状的影响,得出在废弃矿区范围内综合的最佳施肥量为 $N_3P_2K_2$ 处理。研究中的施肥配比提高了油用牡丹产量以及籽实的品质,说明运用该施肥配方在废弃矿区种植油用牡丹有一定可行性,建议在油用牡丹追肥时期及时施肥,使得油用牡丹生长过程中补充其所需的营养元素含量。施肥同样能够改善土壤理化性状,缓解废弃矿区土壤质量低下的情况。试验中氮钾肥施入量在进行拟合方程时均为增产型,未达到一元二次型,所以在具体生产实践过程中,氮、钾肥的施入量应根据当地实际情况在 N_3 、 K_3 水平基础上保持或者再增加少量氮肥以及钾肥,使得对油用牡丹生长、籽实品质的促进作用更佳,磷肥按本试验最佳施肥量即可。

4 结 论

研究表明,氮、磷、钾合理配施显著提高了油用牡丹籽实产量、品质,改善了土壤结构,提高了土壤养分含量以及相关酶活性。最佳施肥处理为 $N_3P_2K_2$,其中果实品质方面单株果荚数、种子百粒质量、种子含油率分别较CK提升了106%、45%、15%。土壤方面全氮、脲酶、磷酸酶分别较CK提升了62%、33%、20%。

因此,废弃矿区油用牡丹种植追肥推荐施肥量为 $N:42.2\text{ kg/hm}^2$ 、 $P_2O_5:63.1\text{ kg/hm}^2$ 、 $K_2O:42.1\text{ kg/hm}^2$,实现最优化提高农业生产经济收入,节省资源,避免浪费,为油用牡丹合理种植提供科学依据,实现环境可持续发展,完成矿区复绿,缓解相关生态问题。

致谢:江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ-宜兴[2020]01)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 汪秋菊,王玥,马钰莹,等.废弃矿区旅游资源评价研究现状与展望[J].煤田地质与勘探,2022,52(4):1-8.
WANG Q J, WANG Y, MA Y Y, et al. Present situation and prospects of tourism resource evaluation in abandoned mining areas[J]. Coal geology & exploration, 2022, 50(4): 1-8.
- [2] 张玉臻,熊建华,叶剑平.基于利益相关者视角的待复垦矿区土地再利用适宜性评价[J].地理与地理信息科学, 2021, 37(1): 89-97.

- ZHANG Y Z, XIONG J H, YE J P. Suitability evaluation of mining-land reuse from the perspective of stakeholders[J]. *Geography and geo-information science*, 2021, 37(1): 89-97.
- [3] 赵新风, 徐海量, 王希义, 等. 人工措施对阿尔泰山采金矿区地表的恢复作用[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(6): 1628-1635.
- ZHAO X F, XU H L, WANG X Y, et al. Effects of artificial measures on surface recovery of gold mining area in Altai Mountain[J]. *Chinese journal of ecology*, 2018, 37(6): 1628-1635.
- [4] 刘慧春, 周江华, 张加强, 等. 油用牡丹单粒种子含油量 NIRS 模型的建立[J]. *核农学报*, 2022, 36(6): 1137-1144.
- LIU H C, ZHOU J H, ZHANG J Q, et al. Establishment of NIRS model for oil content in single seed of oil peony[J]. *Acta agriculturae nucleatae Sinica*, 2022, 36(6): 1137-1144.
- [5] 王琴, 王旭成, 李小云, 等. “3414”施肥效应对宁夏干旱区无芒雀麦种子产量和质量的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(12): 3470-3480.
- WANG Q, WANG X C, LI X Y, et al. Effect of “3414” fertilization on seed yield and quality of *bromus inermis* in arid area of Ningxia[J]. *Acta agrestia Sinica*, 2022, 30(12): 3470-3480.
- [6] 边巴卓玛. 拉萨河谷农区苦荞“3414”肥料效应试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(4): 398-403.
- BIANBADROLAM. Experimental study on fertilizer effect of Tartary buckwheat “3414” in agricultural area of lhasa river valley[J]. *Journal of drainage and irrigation machinery engineering*, 2022, 40(4): 398-403.
- [7] 郑加兴, 王兵伟, 覃永媛, 等. 基于“3414”试验的玉米杂交种桂单 162 优化施肥方案[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(10): 1688-1692.
- ZHENG J X, WANG B W, QIN Y Y, et al. Optimized fertilization scheme for hybrid maize Guidan162 based on 3414 experiment[J]. *Journal of southern agriculture*, 2016, 47(10): 1688-1692.
- [8] 赵铭, 何功秀, 文仕知, 等. 不同配方施肥对杉木人工林幼林生态化学计量特征的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(8): 138-148.
- ZHAO M, HE G X, WEN S Z, et al. Divergent fertilizer effect on stoichiometry characteristics of *Cunninghamia lanceolata* young plantation[J]. *Journal of central south university of forestry & technology*, 2023, 43(8): 138-148.
- [9] 沈乾杰, 刘品桢, 杜启露, 等. 废弃铅锌矿区复耕后土壤-作物重金属污染特征及修复措施[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 223-230.
- SHEN Q J, LIU P Z, DU Q L, et al. Characteristics and restoration measures for heavy-metal polluted soil-crop systems after recultivation in abandoned lead and zinc mining areas[J]. *Bulletin of soil and water conservation*, 2019, 39(5): 223-230.
- [10] 孙丽敏, 高露, 雷雅坤, 等. 河北省冬小麦氮磷钾肥产量效应研究[J]. *华北农学报*, 2018, 33(增刊1): 177-185.
- SUN L M, GAO L, LEI Y K, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on yield of winter wheat in Hebei Province[J]. *Acta agriculturae boreali-Sinica*, 2018, 33(Sup1): 177-185.
- [11] 王丹丹, 李燕, 张庆银, 等. 基于“3414”试验的番茄产量、品质及土壤理化性质的研究[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(5): 62-67.
- WANG D D, LI Y, ZHANG Q Y, et al. Tomato yield, quality, soil physical and chemical properties based on “3414” experiment[J]. *China cucurbits and vegetables*, 2022, 35(5): 62-67.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-38.
- BAO S D. Soil agricultural chemistry analysis[M]. 3th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-38.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 294-297.
- GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986: 294-297.
- [14] 韩峰, 高雪, 彭志良, 等. 贵州水稻 3414 肥料试验模型拟合的探讨[J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(6): 235-238.
- HAN F, GAO X, PENG Z L, et al. The Study on the fit of rice fertilization models from 3414 formulation in guizhou[J]. *Guizhou agricultural sciences*, 2009, 37(6): 235-238.
- [15] 姜天华, 单佩佩, 黄在范, 等. 施用氮肥对油用牡丹叶片氮素吸收积累与籽粒品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3257-3263.
- JIANG T H, SHAN P P, HUANG Z F, et al. Effects of nitrogen fertilization application on the nitrogen uptake, accumulation, and seed quality of oil peony[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2016, 27(10): 3257-3263.
- [16] 熊明月, 郭嘉航, 张福琼, 等. 不同氮肥对鬼针草修复土壤镉污染的效果研究[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(6): 1592-1600.

- XIONG M Y, GUO J H, ZHANG F Q, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on remediation of soil cadmium pollution by *Bidens pilosa* [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(6): 1592-1600.
- [17] 张阁. 油用牡丹‘凤丹’需肥规律和平衡施肥研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- ZHANG G. Research on fertilizer requirement and balanced fertilization of tree peony [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
- [18] 魏双雨, 李敏, 吉文丽, 等. 适宜氮磷钾用量和配比提高油用牡丹产量和出油量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 880-888.
- WEI S Y, LI M, JI W L, et al. Appropriate N, P and K fertilizer rates and combination ratios to increase seed yield and oil production of oil tree peony [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2019, 25(5): 880-888.
- [19] 张静, 许咏梅, 朱倩倩, 等. 新疆南疆核桃肥料效应及推荐施肥量测算[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(3): 65-72.
- ZHANG J, X Y M, ZHU Q Q, et al. Calculation of fertilizer effects and recommended fertilizer amount of walnut in southern Xinjiang [J]. *Soils and fertilizers sciences in China*, 2023(3): 65-72.
- [20] 罗婷, 杨文忠, 张珊珊. 施肥对云南蓝果树幼苗抗旱生理指标的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(2): 54-62.
- LUO T, YANG W Z, ZHANG S S, et al. Effects of fertilization on physiological indicators of drought resistance of *Nyssa Yunnanensis* [J]. *Journal of central south university of forestry & technology*, 2021, 41(2): 54-62.
- [21] MA G Z, CHENG S H, HE W L, et al. Effects of organic and inorganic fertilizers on soil nutrient conditions in rice fields with varying soil fertility [J]. *Land*, 2023, 12(5): 1026.
- [22] 刘俏, 刘仁, 张绿水, 等. 施肥与光照对枫香栽培土壤酶活性及其化学计量比的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(1): 127-138.
- LIU Q, LIU R, ZHANG L S, et al. Effects of fertilization and light on soil enzyme activity and its stoichiometric ratio of *Liquidambar formosana* seedling [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(1): 127-138.
- [23] RAFAEL R B A, FERNANDEZ-MARCOS M L, COCCO S, et al. Benefits of biochars and NPK fertilizers for soil quality and growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) in an acid arenosol [J]. *Pedosphere*, 2019, 29(3): 311-333.
- [24] JIN Y Z, XIONG Y A, SUN X, et al. Effects of combined application of chemical fertilizer reduction with trichoderma organic fertilizer on yield and quality of pepper and enzyme activities in rhizosphere soil [J]. *Journal of Sichuan agricultural university*, 2021, 39(2): 198-204.
- [25] 郑子英, 丁林, 杨晶, 等. 不同施肥类型对蔬菜地土壤抗生素抗性基因和细菌群落结构的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2023, 31(12): 1953-1962.
- ZHENG Z Y, DING L, YANG J, et al. Effect of fertilization types on antibiotic resistance genes and bacterial community in vegetable fields [J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2023, 31(12): 1953-1962.
- [26] 何佳豪, 王方超, 张绿水, 等. 氮磷添加对亚热带杉木林植物-凋落物-土壤化学计量特征的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2023, 45(1): 134-145.
- HE J H, WANG F C, ZHANG L S, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on plant-litter-soil stoichiometric characteristics in a subtropical fir plantation [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(1): 134-145.
- [27] 卢志红, 魏宗强, 杨敏琪, 等. 有机物料添加磷素释放动态与土壤磷组分响应[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(6): 1582-1591.
- LU Z H, WEI Z Q, YANG M Q, et al. Phosphorus release dynamics of organic amendments and soil phosphorus fractions response [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(6): 1582-1591.
- [28] 李敏, 刘亚军, 王文静, 等. 施肥方式对连作甘薯田土壤团聚体稳定性及酶活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(13): 252-260.
- LI M, LIU Y J, WANG W J, et al. Effects of fertilization methods on soil aggregate stability and enzyme activity in continuous cropping sweet potato fields [J]. *Jiangsu agricultural sciences*, 2023, 51(13): 252-260.
- [29] 刘纪爱, 束爱萍, 刘光荣, 等. 施肥影响土壤性状和微生物组的研究进展[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(9): 21-28.
- LIU J A, SHU A P, LIU G R, et al. Research progress on effect of fertilization on soil properties and microbiome [J]. *Biotechnology bulletin*, 2019, 35(9): 21-28.
- [30] 刘思源, 陈志彪, 熊伟, 等. 不同浓度施肥处理对红壤理化性质与油茶苗生长的影响[J]. *亚热带水土保持*, 2023, 35(2): 1-8.
- LIU S Y, CHEN Z B, XIONG W, et al. Effects of different concentrations of fertilization on physicochemical properties of red

- soil and growth of *Camellia oleifera* seedlings[J]. Subtropical soil and water conservation, 2023, 35(2): 1-8.
- [31] 张欣宇, 王呈玉, 李锦秀, 等. 不同施肥处理对黑钙土理化性质及产量的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报: 1-6[2023-11-08]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.1728>.
- ZHANG X Y, WANG C Y, LI J X, et al. Effects of different fertilization treatments on the physical and chemical properties and yield of black calcium soil[J/OL]. Journal of Jilin agricultural university: 1-6[2023-11-08]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.1728>.
- [32] 高志香, 李希来, 张静, 等. 不同施肥处理对高寒矿区渣山改良土酶活性和理化性质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1748-1756.
- GAO Z X, LI X L, ZHANG J, et al. Effects of different fertilization treatments on soil enzyme activities in coal mining residuals of alpine mining area[J]. Acta agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1748-1756.
- [33] 李明静, 罗蕊, 梁啸天, 等. 蓖麻饼粕有机肥不同施用量对花生田土壤养分及酶活性的影响[J]. 花生学报, 2023, 52(3): 73-83.
- LI M J, LUO R, LIANG X T, et al. Effects of different application rates of castor meal organic fertilizer on soil nutrient and enzyme activities in peanut field[J]. Journal of peanut science, 2023, 52(3): 73-83.
- [34] 杨宝平, 陈兵林, 周治国, 等. 施氮量对棉田土壤速效养分和酶活性变化特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 22-26.
- YANG B P, CHEN B L, ZHOU Z G, et al. Effect of nitrogen fertilizer rates on soil available nutrients and soil enzymatic activity variation characteristics in cotton field[J]. Journal of irrigation and drainage, 2012, 31(6): 22-26.
- [35] 王鹏, 温明霞, 金龙飞, 等. 不同施肥处理对柑橘根围土壤质量及丛枝菌根定殖的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2805-2812.
- WANG P, WEN M X, JIN L F, et al. Effects of different fertilizer applications on citrus rhizosphere soil quality and *Arbuscular mycorrhizae* colonization[J]. Chinese journal of applied ecology, 2023, 34(10): 2805-2812.
- [36] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期施肥对黄壤稻田和旱地土壤磷酸酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 948-955.
- LIU Y L, LI Y, ZHANG Y R, et al. Effects of long-term fertilization on phosphatase activities in paddy and dryland of yellow soil[J]. Chinese journal of soil science, 2022, 53(4): 948-955.
- [37] 李振强, 范志懿, 杨荣, 等. 氮肥施用量对灵武长枣果实品质及土壤氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 1-7.
- LI Z Q, FAN Z Y, YANG R, et al. Effects of nitrogen application rate on fruit quality and soil nitrogen content of Lingwu long jujube[J]. Soils and fertilizers sciences in China, 2022(9): 1-7.
- [38] 杨旸, 张树兰, 杨学云. 长期施肥对壤土冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 402-408.
- YANG Y, ZHANG S L, YANG X Y. Effects of long-term fertilization on winter wheat yield and soil nutrients in rainfed loess soil[J]. Chinese journal of soil science, 2018, 49(2): 402-408.
- [39] 韩飞, 何伟, 张行, 等. 不同施肥模式对盐碱地土壤改良及谷子生长的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 860-865.
- HAN F, HE W, ZHANG X, et al. Effects of different fertilization patterns on soil reclamation and foxtail millet growth in saline-alkali soils[J]. Chinese journal of soil science, 2020, 51(4): 860-865.