

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.002

论文标题： 干旱区配方施肥对文冠果光合性能、果实外形及种子产量的影响

作　　者： 潘 越，周 韬，王季姣，等

收稿日期： 2025-08-27

引文格式： 潘越,周韬,王季姣,等.干旱区配方施肥对文冠果光合性能、果实外形及种子产量的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):10-18,61.

Pan Y, Zhou T, Wang J J, et al. Effects of formula fertilization on the photosynthetic performance, fruit morphology, and yield of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge in arid regions[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):10-18,61.

相关论文推荐

Recommended articles

中国北方不同种源文冠果种子表型性状差异性研究

Study on differences in seed phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge from different provenances in northern China

基于GRA的干旱半干旱区文冠果新种质综合评价

Comprehensive evaluation of *Xanthoceras sorbifolia* new germplasm in arid and semi-arid area based on GRA

内蒙古翁牛特旗文冠果优良单株的选择

Superior individual selection of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge in Inner Mongolia Wengniute Banner

NaCl胁迫对文冠果幼苗生长性状的影响

Effects of NaCl stress on growth properties of *Xanthoceras sorbifolia*

基于AHP的干旱半干旱区丰产型文冠果优良单株选择

Effects of different substrates and different rooting accelerators on softwood cutting of *Tilia amurensis*

新疆奇台地区不同水肥条件下文冠果种实性状的差异

Differences of fruit traits of yellow horn under different water and fertilizer conditions in Qitai region of Xinjiang

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.002 http: //qks.csuft.edu.cn

干旱区配方施肥对文冠果光合性能、果实外形及种子产量的影响

潘 越，周 韬，王季姣，虎海防，王天斌

（新疆维吾尔自治区林业科学院 荒漠绿洲生态系统保护修复国家林业和草原局重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘 要：【目的】探讨不同氮、磷、钾配方施肥对文冠果‘蒙冠 1 号’光合特性、产量和果实品质的影响，为该品种在新疆天山北麓产区的推广种植提供合理的施肥建议。【方法】以新疆 6 年生文冠果‘蒙冠 1 号’为研究对象，采用“3414”施肥效应试验，氮、磷、钾各设 4 个水平：0（不施肥）、1（常规施肥量的 50%）、2（常规施肥量）、3（常规施肥量的 150%），其中常规施肥量为纯 N 0.75 kg/ 株、P_2O_5 0.60 kg/ 株、K_2O 0.20 kg/ 株，分析不同氮磷钾配比对叶片光合特性、光响应过程、果实外形及种子产量的影响。使用直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数模型和直角双曲线修正模型对净光合速率与光合有效辐射之间的响应关系进行拟合，分析光合参数（净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度、水分利用效率）与产量及品质的关系。【结果】直角双曲线修正模型拟合效果最佳，拟合得到的初始量子效率、光补偿点、暗呼吸速率、最大净光合速率和光饱和点最接近实测值。常规氮肥施用量（$N_2P_2K_2$）能显著提高叶片的净光合速率，且高钾处理（$N_2P_2K_3$）能显著提升叶片的水分利用效率，相较于 $N_0P_0K_0$，净光合速率提高了 57.01%，水分利用效率提高了 93.62%。在产量与果实性状方面，$N_2P_2K_2$ 和 $N_2P_3K_2$ 施肥配比较 $N_0P_0K_0$ 分别提高了 68.17% 和 62.28%，前者在种子数量、果实横径、单果质量和单果种子质量方面分别增加了 31.50%、14.91%、56.50% 和 115.21%；后者的含油率提高了 14.03%。【结论】当氮、磷、钾的施肥量分别为 413.54、613.64、213.44 kg/hm^2 时，可有效提高‘蒙冠 1 号’的光合特性、产量和果实品质。

关键词：文冠果；光合特性；产量；品质；配方施肥

中图分类号：S723.7 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)09-0010-09

Effects of formula fertilization on the photosynthetic performance, fruit morphology, and yield of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge in arid regions

Pan Yue, Zhou Tao, Wang Jijiao, Hu Haifang, Wang Tianbin

(Xinjiang Academy of Forestry Science, Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Desert Oasis Ecosystem Protection and Restoration, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】To explore the effects of different nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer levels on the photosynthetic characteristics, yield, and fruit quality of ‘Menguan 1’. and to provide reasonable fertilization recommendations for the cultivation of this variety in the eastern part of the northern Tianshan mountains in Xinjiang.【Method】Six-year-old *Xanthoceras sorbifolium* ‘Mengguan 1’ trees grown in Xinjiang were used as the experimental materials. A “3414” fertilizer-response experimental design was adopted, in which nitrogen, phosphorus, and potassium were each assigned four application levels: 0 (no fertilization), 1 (50% of the conventional fertilization rate), 2 (the conventional fertilization rate), and 3 (150% of the conventional fertilization rate). The conventional fertilization rates were defined as 0.75 kg pure N plant^{-1}, 0.60 kg P_2O_5 plant^{-1}, and 0.20 kg K_2O plant^{-1}. On this basis, the effects of different N-P-K fertilization combinations on leaf photosynthetic characteristics, light-response parameters, fruit morphology, and seed yield were systematically evaluated. The rectangular hyperbolic model (RH), non-rectangular hyperbolic model (NRH), exponential model (EX), and modified rectangular hyperbolic model (MRH) were used to fit the P_n-PAR curve, and the photosynthetic

收稿日期（Received）：2025-08-27 **修订日期**（Revised）：2025-11-03

基金项目：中央财政林草科技推广示范项目（〔2025〕TG02 号）；新疆领军人才引进计划重点创新平台项目（XJRC-2025-KJ-YJ-CXPT-017）；新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务经费管理项目（KY2025066）。

第一作者：潘越（18690187637@163.com），副研究员，硕士。**通信作者：**王天斌（603019783@qq.com），正高级工程师，硕士。

引文格式：潘越 , 周韬 , 王季姣 , 等 . 干旱区配方施肥对文冠果光合性能、果实外形及种子产量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2026,46(9):10-18,61.

Pan Y, Zhou T, Wang J J, et al. Effects of formula fertilization on the photosynthetic performance, fruit morphology, and yield of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge in arid regions[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):10-18,61.

parameters (P_n, T_r, C_i, WUE) and yield and quality were analyzed.【Result】The MRH model provided the best fit, with the calculated AQY, LCP, R_d, P_{nmax}, and LSP being closest to the measured values. The application of conventional nitrogen fertilizer ($N_2P_2K_2$) significantly increased leaf P_n, while high potassium fertilizer ($N_2P_2K_3$) significantly enhanced the WUE of 'Menguan 1'. Compared to the control ($N_0P_0K_0$), P_n increased by 57.01% and WUE by 93.62%. Regarding yield and fruit traits, the fertilization ratios of $N_2P_2K_2$ and $N_2P_3K_2$ increased the single-plant yield by 68.17% and 62.28%, respectively, compared to $N_0P_0K_0$. The former increased seed number, fruit diameter, single fruit weight, and single seed weight by 31.50%, 14.91%, 56.50% and 115.21%, respectively, while the latter increased oil content by 14.03%.【Conclusion】When the pure amounts of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers were 413.54 kg/hm^2, 613.64 kg/hm^2, and 213.44 kg/hm^2, respectively, the photosynthetic characteristics, yield, and fruit quality of 'Menguan 1' could be effectively improved.

Keywords: *Xanthoceras sorbifolia* Bunge; photosynthetic characteristics; yield; quality; formula fertilization

文冠果 *Xanthoceras sorbifolia* 是一种具有高油率和高营养价值的木本油料作物，经济利用价值突出，同时兼具良好的生态功能，可发挥防风固沙、维系区域水土平衡的作用[1]。该树种环境适应性强，能够适应沙地、荒山等贫瘠干旱的立地环境，为新疆干旱区特色林果业提质增效与生态治理提供优良种质资源与支撑条件[2]。然而，独特的干旱环境导致土壤水分和养分供应非常有限，在贫瘠立地条件下，养分供给不足以成为限制文冠果人工栽培、影响其产量与品质提升的主要因子。与此同时，现有的文冠果栽培管理中，缺乏系统科学的施肥方案，施肥方式不合理、施肥时间不科学等因素严重影响了文冠果的生长发育、产量和品质[3]。通过分析土壤肥力状况和作物生长需求，合理配置不同类型的肥料，已被证明能够提高肥料利用率[4]，减少肥料浪费[5]，并显著促进植物的光合作用，进而提高作物的生长速度和产量[6]。近年来，针对木本油料作物的配方施肥研究已取得一定进展。钟建等[7]研究表明，氮磷钾配比施肥（幼龄林，N、P、K 的质量比为 2∶1∶1；成熟林，N、P、K 的质量比为 2∶1∶2）可显著促进油茶生长并提高产量与含油率。魏双雨等[8]采用“3414”试验设计，得出油用牡丹‘凤丹’的氮、磷、钾最优推荐施肥量为 343.2、109.7、248.4 kg/hm^2，可提高‘凤丹’农艺性状、产量、出仁率、种仁含油率等指标，进而提高产油量。

目前，针对新疆地区文冠果的施肥研究仍处于起步阶段，尚未系统开展不同施肥条件下施肥效果的试验研究。因此，优化文冠果的施肥方案，尤其是在干旱和半干旱地区的施肥管理，已成为提高产量和品质的关键切入点。基于此，本研究将着重探讨不同施肥条件下配方施肥对文冠果生长发育、光合性能、果实产量和品质的影响，旨在为新疆文冠果产业的可持续发展提供科学依据和实践指导。

1 研究区概况

试验地点位于新疆维吾尔自治区奇台县西地镇桥子村的文冠果种植基地（89°67′ E，44°10′ N），海拔 711 m。该区域年均气温为 5.5 ℃，年日照时数为 3 130 h，年降水量为 271.4 mm。基地土壤为沙壤土，水解性氮、有效磷、速效钾、有机质含量分别为 73.70 mg·kg^{-1}、11.57 mg·kg^{-1}、821.27 mg·kg^{-1}、12.45 g·kg^{-1}，pH 值为 8.03。

2 材料与方法

2.1 研究对象与试验设计

文冠果为 6 年生‘蒙冠 1 号’，砧木为文冠果实生苗，东西行向种植，株行距为 1.5 m×5.0 m，间作打瓜 *Citrullus lanatus* var. *citroides*。灌溉方式采用滴灌。为消除植株间初始差异对结果的干扰，试验开始前 1 a 对所有候选样株进行标准化培育：于萌芽期与果实膨大期分别统一追施尿素及复合肥，其他田间管理措施均一致，最终筛选出长势均匀的健康植株用于后续试验。

试验设计采用“3414”最优回归试验方案，设定氮（N）、磷（P）和钾（K）3 个肥料因素，施肥量设 4 个水平，分别为 0（不施肥）、1（常规施肥量的 50%）、2（常规施肥量）、3（常规施肥量的 150%），共 14 个处理组。每组设置 3 个重复小区，处理随机排列，每个小区内随机选择 5 株试验树，总计 210 株。供试株的平均树高为（2.20±0.30）m，冠幅为（1.89±0.84）m。

所用氮肥为尿素（总 N 含量为 46.30%），由上海同瑞生物科技有限公司提供；磷肥为过磷酸钙（P_2O_5 含量不小于 16%），供应商为湖北红山化工有限公司；钾肥为硫酸钾（K_2O 含量不小于 50%），供应商为中农集团控股股份有限公司。

田间施肥时间定于 2025 年 5 月 24 日，在‘蒙冠 1 号’果实膨大期进行一次性施肥，施肥方式

采用沟施，施肥后立即浇水。大田试验设计见表 1。

表 1　大田试验设计
Table 1　Field trial design

序号 Serial No.	处理 Treatment	单株施肥量纯量 Fertilizer application per plant /kg			单株施肥量 Fertilizer application rate per plant /kg		
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
1	$N_0P_0K_0$	0	0	0	0	0	0
2	$N_0P_2K_2$	0	0.60	0.20	0	3.75	0.40
3	$N_1P_2K_2$	0.38	0.60	0.20	0.81	3.75	0.40
4	$N_2P_0K_2$	0.75	0	0.20	1.62	0	0.40
5	$N_2P_1K_2$	0.75	0.30	0.20	1.62	1.88	0.40
6	$N_2P_2K_2$	0.75	0.60	0.20	1.62	3.75	0.40
7	$N_2P_3K_2$	0.75	0.90	0.20	1.62	5.63	0.40
8	$N_2P_2K_0$	0.75	0.60	0	1.62	3.75	0
9	$N_2P_2K_1$	0.75	0.60	0.10	1.62	3.75	0.20
10	$N_2P_2K_3$	0.75	0.60	0.30	1.62	3.75	0.60
11	$N_3P_2K_2$	1.13	0.60	0.20	2.43	3.75	0.40
12	$N_1P_1K_2$	0.38	0.30	0.20	0.81	1.88	0.40
13	$N_1P_2K_1$	0.38	0.60	0.10	0.81	3.75	0.20
14	$N_2P_1K_1$	0.75	0.30	0.10	1.62	1.88	0.20

2.2　研究方法

2.2.1　光响应曲线

试验于 2025 年 7 月 10 日（果实成熟期）晴朗天气下进行，测量时间为 9:00—11:00，选择文冠果植株中上部 3 片生长健康、无病虫害的功能叶作为测量对象。采用 LI-COR 公司生产的便携式光合仪 Li-6400，记录各项测量数据并取平均值。在开始测量前，将光合有效辐射（Photosynthetically active radiation，PAR）设置为 1 200 μmol·m^{-2}·s^{-1}，进行 15 ～ 20 min 的叶片诱导处理。通过红蓝光源系统分别测量不同 PAR 值下的净光合速率（Net photosynthetic rate，Pn），PAR 梯度设置为 2 000、1 700、1 500、1 200、1 000、800、500、300、200、150、80、50、20 及 0 μmol·m^{-2}·s^{-1}。测量从最高 PAR 值开始，每个梯度的测量时长为 180 s，红蓝光的比例为 3∶1（红光 650 nm，蓝光 450 nm）。测定过程中 CO_2 浓度保持在（375±10）μmol·mol^{-1}，叶室温度控制在（25±0.5）℃，空气流速为（400±1）μmol·s^{-1}。

2.2.2　光响应模型

本研究分别采用直角双曲线模型[9]（Rectangular hyperbola model，RH）、非直角双曲线模型[10]（Non-rectangular hyperbola model，NRH）、指数函数模型[11]（Exponential function model，EX）和直角双曲线修正模型[12]（Modified rectangular hyperbola model，MRH）对不同施肥处理下 Pn 与 PAR 之间的响应关系进行拟合分析。通过比较不同模型的决定系数（R^2）及拟合获得的光响应参数，对各模型的适用性进行评价，并筛选最适宜描述文冠果叶片光响应特征的模型。

利用弱光环境（PAR ≤ 200 μmol·m^{-2}·s^{-1}）下的实测数据进行回归分析，从中可以获得表观量子效率（Apparent quantum yield，AQY）、光补偿点（Light compensation point，LCP）和暗呼吸速率（Dark respiration rate，Rd）。此外，通过实测数据估算最大净光合速率（Maximum net photosynthetic rate，Pn_{max}）和光饱和点（Light saturation point，LSP）[13]。

2.2.3　三元二次肥料效应对文冠果‘蒙冠 1 号’种子产量的拟合模型

定量描述 N、P、K 三元施肥对文冠果‘蒙冠 1 号’种子产量的影响，建立并检验三元二次回归模型，以揭示一次效应、交互效应及二次饱和 / 递减效应，并据此寻找产量的最优施肥区间。

设响应变量为种子产量（Y），3 种肥料施用量分别记为 X_1（氮）、X_2（磷）、X_3（钾）。采用包含一次项、交互项与二次项的三元二次回归模型对数据进行拟合，模型表达式为：

$$Y=a_0+a_1X_1+a_2X_2+a_3X_3+a_4X_1^2+a_5X_2^2+a_6X_3^2+a_7X_1X_2+a_8X_1X_3+a_9X_2X_3。$$

式中：a_0 为常数项；a_1 ～ a_3 为一次效应系数；a_4 ～ a_6 为二次效应系数；a_7、a_8 为交互效应系数。

模型参数采用最小二乘法（OLS）估计，并结合逐步回归（Stepwise）以避免过拟合。模型整体及各回归系数的显著性通过方差分析（ANOVA）与 t 检验来完成，显著性水平设定为 $P < 0.05$。

2.2.4　光合特性参数的测定

试验于 2025 年 8 月 22 日（果实成熟期）进行，选取‘蒙冠 1 号’植株功能叶片作为光合特性测定样本，测量时间为 9:00—11:00。使用 Li-6400 便携式光合仪，记录不同处理下的净光合速率（Pn）、蒸腾速率（Transpiration rate，Tr）和胞间 CO_2 浓度（Intercellular CO_2 concentration，Ci）。水分利用效率（Water use efficiency，WUE）由 Pn 与 Tr 的比值计算得出。

2.2.5　果实品质指标的测定

采用游标卡尺测量文冠果果实的纵径、横径以及种子直径。每株选择 30 枚果实进行测量，记录单果种子数量[14]。此外，统计 15 棵单株的

结果数量，并取均值作为单株结果数量，同时统计单株干种子产量，采用索氏抽提法测定种子含油率 [15]。

2.3　数据统计

通过单因素方差分析（One-way ANOVA）及 Duncan 法，分析不同 N、P、K 配比对‘蒙冠 1 号’产量与果实品质的影响。采用 SPSS 27.0 和 Excel 2019 软件进行数据分析。

3　结果与分析

3.1　不同施肥处理对‘蒙冠 1 号’净光合速率的影响

不同氮磷钾肥配比对‘蒙冠 1 号’实测 Pn-PAR 光响应参数的影响见表 2。当 PAR ≤ 800 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时，Pn 随 PAR 的增加迅速上升；当 800 < PAR < 1 700 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时，Pn 的上升速度趋于平缓；当 PAR ≥ 1 700 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时，Pn 的增幅进一步减缓或呈现下降趋势。当 P、K 肥用量一致时，Pn 随施氮量增加呈先升后降趋势。其中，$N_2P_2K_2$ 处理下 Pn 最高，为 14.73 μmol·m^{-2}·s^{-1}，其次是 $N_1P_2K_2$ 处理（14.09 μmol·m^{-2}·s^{-1}），$N_0P_2K_2$ 处理最低（13.75 μmol·m^{-2}·s^{-1}），表明常规氮肥施用量最有助于提高光合效率；在 N、K 施用量相同的情况下，$N_2P_2K_2$ 处理下的 Pn 最高，为 14.73 μmol·m^{-2}·s^{-1}，$N_2P_1K_2$ 处理下的 Pn 最低（10.53 μmol·m^{-2}·s^{-1}），说明减少磷肥施用对光合效率有负面影响；在氮、磷施用量相同的条件下，钾肥施用量的增加导致 Pn 呈先升后降的趋势，$N_2P_2K_2$ 处理下的 Pn 最高，为 14.73 μmol·m^{-2}·s^{-1}，$N_2P_2K_0$ 处理下 Pn 较低（13.24 μmol·m^{-2}·s^{-1}），表明适量施钾有助于提高叶片光合能力。综合 14 组处理结果，$N_2P_2K_2$ 处理的 Pn 值最高，其次是 $N_1P_2K_2$ 处理，$N_0P_0K_0$ 处理最小。

表 2　不同施肥处理对‘蒙冠 1 号’净光合速率的影响

Table 2　Effects of different fertilization treatments on the net photosynthetic rate of ‘Mengguan 1’

处理 Dispose	不同光合有效辐射下的净光合速率 Net photosynthetic rate under different PAR /(μmol·m^{-2}·s^{-1})														
	0	10	20	50	80	150	200	300	500	800	1 000	1 200	1 500	1 700	2 000
$N_0P_0K_0$	−1.16	−0.32	0.74	1.59	2.27	3.48	4.52	6.06	7.48	8.72	9.13	9.42	9.49	9.68	9.69
$N_0P_2K_2$	−1.56	−0.71	0.38	1.38	1.95	3.39	4.85	7.00	9.85	12.06	12.87	13.36	13.67	12.77	13.75
$N_1P_2K_2$	−1.41	−0.48	0.66	1.68	2.30	3.69	4.87	6.94	9.52	11.59	12.45	13.12	14.09	14.04	13.88
$N_2P_0K_2$	−1.44	−0.73	0.26	1.17	1.70	3.01	4.10	6.04	8.83	11.26	12.09	12.63	13.26	13.46	13.10
$N_2P_1K_2$	−0.93	−0.08	0.81	1.84	2.37	3.66	4.61	6.07	7.85	9.31	9.80	10.14	10.53	10.41	10.53
$N_2P_2K_2$	−1.34	−0.53	0.62	1.70	2.28	3.80	5.13	7.28	10.26	12.62	13.56	14.17	14.48	13.72	14.73
$N_2P_3K_2$	−1.61	−0.69	0.49	1.47	2.09	3.45	4.71	6.64	9.19	11.22	11.92	12.31	12.38	11.75	12.84
$N_2P_2K_0$	−1.55	−0.80	0.20	1.09	1.60	2.95	3.98	5.92	8.56	10.95	11.77	12.39	13.23	13.24	13.18
$N_2P_2K_1$	−1.50	−0.68	0.40	1.37	1.97	3.37	4.56	6.72	9.64	12.08	12.74	13.20	13.22	12.79	13.52
$N_2P_2K_3$	−1.45	−0.70	0.39	1.34	1.91	3.27	4.47	6.41	9.00	11.13	11.94	12.50	13.24	13.46	13.21
$N_3P_2K_2$	−1.15	−0.35	0.80	1.88	2.42	3.84	5.06	7.01	9.46	11.30	12.00	12.44	12.51	11.61	12.71
$N_1P_1K_2$	−1.30	−0.44	0.53	1.58	2.10	3.52	4.66	6.60	9.46	11.79	12.64	13.24	13.67	12.20	13.69
$N_1P_2K_1$	−1.33	−0.62	0.52	1.45	2.01	3.37	4.51	6.42	8.95	10.87	11.77	12.07	12.69	12.19	12.70
$N_2P_1K_1$	−1.19	−0.25	0.77	1.77	2.29	3.64	4.80	6.63	8.95	10.73	11.44	11.87	11.99	11.05	12.23

3.2　不同施肥处理对‘蒙冠 1 号’光响应参数的影响

14 种施肥处理下，‘蒙冠 1 号’光响应模型的拟合参数与实测值比较结果见表 3。4 种模型中，非直角双曲线模型的 R^2 均值最低，拟合精度最差；直角双曲线模型和指数函数模型的拟合效果居中；直角双曲线修正模型的 R^2 平均值最高（R^2 > 0.996），拟合效果最佳。AQY、LCP 和 Rd 主要反映植株在弱光环境下的光能利用能力，而 LSP 和 Pn_{max} 则反映在强光条件下的光利用潜力 [16]。在相同磷、钾水平下，不施氮（$N_0P_2K_2$）处理的 LSP 和 Pn_{max} 最低，常规氮水平（$N_2P_2K_2$）的 Pn_{max} 显著高于其他处理，说明适量氮肥可促进光合色素合成和碳同化酶活性，从而提高叶片光能转化效率。不施氮（$N_0P_2K_2$）处理的 LCP 和 Rd 最高，表明氮素缺乏会降低光合潜力。在相同氮、钾水平下，低磷处理（$N_2P_1K_2$）的 LSP 最高，而常规磷水平（$N_2P_2K_2$）的 Pn_{max} 最高；低磷处理（$N_2P_1K_2$）的 LCP 和 Rd 最低。在氮、磷水平一致时，高钾处理（$N_2P_2K_3$）的 LSP 最高，且 AQY、LCP 和 Rd 均

表 3 不同施肥处理对‘蒙冠 1 号’4 种光响应模型拟合参数与实测值的比较

Table 3 Comparison of fitting parameters of four light response models of ‘Mengguan 1’ under different fertilization treatments with the measured values

经验参数 Empirical model	光响应参数 Photosynthetic parameters	$N_0P_0K_0$	$N_0P_2K_2$	$N_1P_2K_2$	$N_2P_0K_2$	$N_2P_1K_2$	$N_2P_2K_2$	$N_2P_3K_2$
实测值 Measured value	Pn_{max}	9.873 2	13.665 2	14.086 9	13.510 8	10.525 8	14.482 5	12.836 8
	LCP	13.035 0	16.520 1	14.199 6	17.396 4	10.939 2	14.578 9	15.869 6
	Rd	0.067 8	0.872 1	0.690 3	0.899 0	0.388 6	0.660 7	0.885 8
	AQY	0.106 4	0.109 2	0.114 5	0.098 5	0.089 6	0.115 1	0.117 6
RH 模型 Rectangular hyperbola model	AQY	0.051 3	0.052 5	0.045 4	0.041 0	0.045 8	0.051 7	0.052 4
	Pn_{max}	11.961 0	18.145 1	18.477 2	18.481 6	12.943 5	19.105 9	16.427 6
	Rd	0.764 2	1.269 5	0.834 8	1.089 3	0.496 2	1.010 9	1.187 3
	LCP	15.919 5	25.994 6	19.248 2	28.259 1	11.263 9	20.659 1	24.407 9
	R^2	0.994 0	0.986 5	0.995 4	0.994 1	0.994 6	0.988 2	0.985 9
NRH 模型 Non-rectangular hyperbola model	AQY	0.047 6	0.030 8	0.039 5	0.028 5	0.042 9	0.031 7	0.031 5
	Pn_{max}	11.780 4	15.111 9	17.561 6	15.786 8	12.737 4	16.057 7	14.074 0
	Rd	0.714 7	0.742 8	0.710 6	0.762 2	0.450 1	0.513 6	0.711 9
	LCP	15.841 2	24.350 3	18.502 7	27.168 6	10.833 6	16.285 7	22.887 7
	R^2	0.993 4	0.992 2	0.995 1	0.996 2	0.994 1	0.992 3	0.989 2
EX 模型 Exponential model	AQY	0.033 0	0.036 5	0.032 8	0.030 0	0.031 3	0.037 0	0.035 4
	Pn_{max}	9.537 8	13.687 2	14.145 8	13.657 6	10.446 7	14.622 5	12.530 3
	Rd	1.045 9	1.071 7	1.036 8	1.062 0	1.017 7	1.048 8	1.069 8
	LCP	33.551 4	30.575 5	32.822 2	36.906 1	34.182 6	29.444 7	31.565 4
	R^2	0.992 5	0.994 1	0.995 0	0.997 1	0.993 6	0.994 4	0.992 4
MRH 模型 Modified rectangular hyperbola model	Rd	0.013 9	0.913 4	0.716 2	0.889 6	0.383 4	0.654 3	0.851 0
	Pn_{max}	9.677 6	13.591 0	14.284 5	13.380 6	10.549 0	14.441 5	12.481 3
	LSP	1 986.720 0	1 444.380 0	2 402.540 0	1 857.290 0	2 038.030 0	1 499.880 0	1 432.170 0
	LCP	15.380 0	24.883 8	18.229 1	27.451 4	9.805 0	17.684 4	23.214 0
	AQY	0.024 7	0.026 6	0.027 0	0.024 3	0.024 7	0.028 1	0.026 8
	R^2	0.994 6	0.996 1	0.995 8	0.996 8	0.995 4	0.996 1	0.994 4
经验参数 Empirical model	光响应参数 Photosynthetic parameter	$N_2P_2K_0$	$N_2P_2K_1$	$N_2P_2K_3$	$N_3P_2K_2$	$N_1P_1K_2$	$N_1P_2K_1$	$N_2P_1K_1$
实测值 Measured value	Pn_{max}	13.240 3	13.522 5	13.960 8	12.710 5	13.686 4	12.703 4	12.227 2
	LCP	17.985 3	16.306 7	16.426 4	13.009 1	14.527 3	15.414 2	12.441 0
	Rd	0.950 2	0.908 8	0.702 1	0.898 1	0.391 7	0.687 4	0.437 5
	AQY	0.100 7	0.107 1	0.108 6	0.114 7	0.097 3	0.113 6	0.102 0
RH 模型 Rectangular hyperbola model	AQY	0.039 7	0.050 3	0.043 4	0.053 6	0.048 0	0.046 1	0.050 4
	Pn_{max}	18.460 3	17.967 1	17.977 7	15.842 4	17.708 8	16.647 0	15.167 4
	Rd	1.134 1	1.204 2	1.024 4	0.822 5	0.963 7	0.973 0	0.778 6
	LCP	30.397 5	25.673 7	25.019 9	16.181 4	21.251 5	22.399 7	16.292 5
	R^2	0.994 8	0.985 9	0.995 6	0.995 4	0.995 4	0.995 4	0.995 4
NRH 模型 Non-rectangular hyperbola model	AQY	0.029 6	0.028 3	0.034 3	0.031 5	0.027 5	0.031 1	0.030 1
	Pn_{max}	16.220 6	14.683 3	16.403 9	13.583 5	14.557 4	14.546 0	13.057 3
	Rd	0.873 4	0.639 0	0.817 8	0.338 5	0.423 2	0.628 5	0.332 4
	LCP	30.174 1	22.694 3	24.498 9	10.799 4	15.431 6	20.463 6	11.094 5
	R^2	0.995 8	0.992 8	0.996 0	0.988 7	0.987 9	0.993 3	0.987 7
EX 模型 Exponential model	AQY	0.028 9	0.035 3	0.031 2	0.036 8	0.034 2	0.032 5	0.034 7
	Pn_{max}	13.561 9	13.542 3	13.499 8	12.493 0	13.534 9	12.696 1	11.947 6
	Rd	1.065 2	1.069 0	1.054 9	1.040 6	1.051 2	1.054 3	1.039 9
	LCP	38.343 7	31.510 7	35.249 0	29.490 9	31.962 1	33.895 7	31.371 0
	R^2	0.996 8	0.994 2	0.996 4	0.992 2	0.990 5	0.995 2	0.991 3
MRH 模型 Modified rectangular hyperbola model	Rd	0.949 7	0.913 4	0.716 2	0.889 6	0.383 4	0.729 7	0.446 3
	Pn_{max}	13.299 5	13.591 0	14.284 5	13.380 6	10.549 0	12.538 8	11.936 7
	LSP	1 954.570 0	1 444.380 0	2 402.540 0	1 857.290 0	2 038.030 0	1 640.870 0	1 398.790 0
	LCP	29.842 8	24.883 8	18.229 1	27.451 4	9.805 0	20.828 0	12.670 2
	AQY	0.024 3	0.026 6	0.027 0	0.024 3	0.024 7	0.025 7	0.025 3
	R^2	0.996 7	0.996 1	0.995 8	0.996 8	0.995 4	0.995 7	0.993 9

最低，说明在光照资源丰富的地区，增施钾肥不仅有助于降低弱光下的碳亏损，还能提升强光下的光合潜力。

3.3　不同氮磷钾肥处理对‘蒙冠 1 号’光合作用的影响

图 1 显示，随着氮、磷、钾施肥量的变化，‘蒙冠 1 号’叶片的净光合速率、蒸腾速率、胞间二氧化碳浓度和水分利用效率均表现出显著差异（$P < 0.05$）。在磷、钾施肥量相同的情况下，氮肥施用量对 Pn、Ci 和 Tr 有显著影响，其中常规施氮量（$N_2P_2K_2$）可显著提高叶片的净光合速率，而高氮施肥（$N_3P_2K_2$）则显著促进了蒸腾速率。低氮施肥（$N_1P_2K_2$）同样提高了 Pn 和 Ci，但未达到常规施氮量的水平；常规施磷量（$N_2P_2K_2$）可显著提高 Pn，表明施用适量磷肥能够有效提高光合效率；而不同磷肥施用量对 Tr 和 WUE 的影响则不显著。在氮、磷施肥量相同的情况下，钾肥的增加能显著提高 WUE。施用高钾量（$N_2P_2K_3$）时，WUE 显著高于低钾（$N_2P_2K_1$）和常规钾量（$N_2P_2K_2$）处理。同时，施高钾（$N_2P_2K_3$）和常规钾（$N_2P_2K_2$）处理的 Ci 均显著低于未施钾肥（$N_2P_2K_0$）处理。

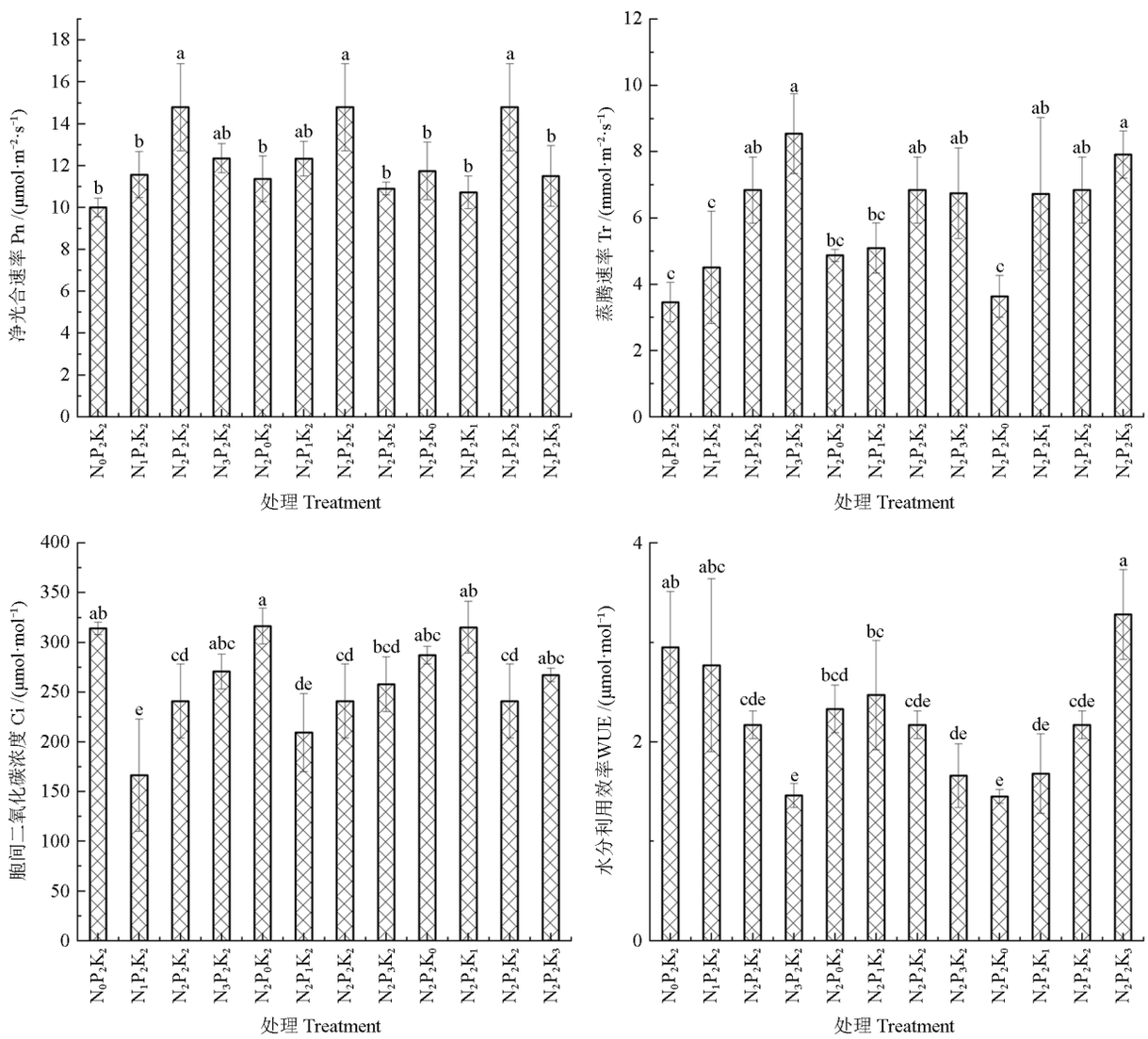


图 1　不同氮磷钾肥处理对‘蒙冠 1 号’叶片光合作用的影响

Fig. 1　Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatments on the photosynthesis of ‘Mengguan 1’ leaves

3.4　不同氮磷钾肥处理对‘蒙冠 1 号’果实品质的影响

由表 4 可知，不同氮、磷、钾施肥量对‘蒙冠 1 号’的单果种子数量、单果质量、种子长度、种子宽度、单粒质量以及含油率均产生了不同程度的影响，其中单果种子质量和含油率的变化尤为显著。在不同施肥处理下，‘蒙冠 1 号’单果种子数量的变化范围为 15 ～ 27 粒，且在 $N_2P_2K_2$ 和 $N_2P_2K_3$ 处理下，单果种子数最高，比 $N_0P_0K_0$ 高出 31.50%，表明增加钾肥有助于提升种子数量。单果质量变

化范围为 20.70 ～ 49.16 g，其中 $N_2P_2K_2$ 处理的单果质量最高，达到 43.46 g，$N_2P_2K_3$ 次之。单果种子质量的变异较大，变化范围为 9.21 ～ 34.97 g，$N_2P_2K_2$ 处理下单果种子质量最高，较 $N_0P_0K_0$ 增加了 115.21%，存在显著差异；在不同钾水平处理中，$N_2P_2K_0$ 的单果种子质量最低，较 $N_0P_0K_0$ 仅高出 7.64%。在含油率方面，$N_2P_3K_2$ 处理的含油率最高，显著优于其他处理，比 $N_0P_0K_0$ 高出 14.03%。

表 4 不同氮磷钾施肥量对‘蒙冠 1 号’果实品质的影响

Table 4 Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilization amounts on the fruit quality of ‘Mengguan 1’

处理 Treatment	单果种子数 Seeds per fruit / 粒	果实平均纵径 Average fruit length /mm	果实平均横径 Average fruit diameter /mm	单果质量 Single fruit weight /g	种子长 Seed length /mm	种子宽 Seed width /mm	单果种子质量 Single fruit seed weight /g	含油率 Oil content /%
$N_0P_0K_0$	18.00±2.65 cd	49.46±2.06 ab	52.45±4.83 abc	27.77±8.19 cd	11.71±0.92 ef	10.88±0.76 c	13.74±4.85 d	48.67±0.65 c
$N_0P_2K_2$	20.33±1.16 abcd	55.20±4.53 ab	55.99±2.72 ab	32.74±1.05 bcd	13.40±1.19 bcde	12.24±1.10 bc	15.82±3.66 cd	50.90±1.51 b
$N_1P_2K_2$	19.00±3.61 abcd	52.61±3.18 ab	54.90±5.30 ab	30.48±7.53 bcd	16.04±2.19 a	13.74±0.38 ab	16.57±0.78 cd	50.47±0.75 b
$N_2P_0K_2$	20.33±2.52 abcd	57.69±8.10 ab	50.62±3.89 bc	35.81±6.76 abc	14.55±0.41 ab	13.79±0.31 ab	20.27±2.97 bc	51.40±0.56 b
$N_2P_1K_2$	19.67±3.06 abcd	51.11±5.54 ab	54.01±7.15 abc	32.81±9.25 bcd	12.90±0.80 bcdef	12.53±3.25 abc	16.55±4.03 cd	50.97±0.15 b
$N_2P_2K_2$	23.67±2.89 a	58.06±2.68 ab	60.27±1.95 a	43.46±4.32 a	13.43±0.39 bcde	11.81±0.75 bc	29.57±4.74 a	51.77±0.60 b
$N_2P_3K_2$	21.67±2.52 bcd	51.92±3.31 ab	55.03±1.98 ab	31.23±6.75 bcd	12.92±0.75 bcdef	13.30±0.47 ab	24.08±3.00 b	55.50±0.70 a
$N_2P_2K_0$	18.67±3.79 abcd	55.53±3.01 ab	51.51±3.17 abc	23.98±1.13 d	14.45±0.64 ab	14.58±1.32 a	14.79±3.12 cd	50.90±1.20 b
$N_2P_2K_1$	22.67±0.58 abc	47.49±0.93 b	45.29±0.44 c	27.74±5.21 cd	12.03±0.29 def	10.93±0.35 c	14.97±1.09 cd	51.63±0.70 b
$N_2P_2K_3$	23.67±4.04 a	59.29±13.29 a	57.96±4.59 a	41.26±7.25 ab	12.91±0.47 bcdef	11.12±0.39 c	20.58±4.01 bc	50.53±0.65 b
$N_3P_2K_2$	18.33±2.52 abcd	55.22±7.25 ab	50.78±7.26 bc	29.57±4.74 cd	14.04±0.89 bc	12.48±1.16 abc	15.82±2.95 cd	47.80±1.41 c
$N_1P_1K_2$	17.33±0.58 d	56.19±7.89 ab	57.38±8.34 ab	28.52±4.78 cd	13.75±0.76 bcd	12.83±0.95 abc	16.44±2.58 cd	50.47±0.95 b
$N_1P_2K_1$	22.67±0.58 abc	58.31±1.47 ab	51.08±0.73 bc	29.19±0.73 cd	11.54±0.92 f	10.65±0.57 c	16.36±0.25 cd	50.63±0.60 b
$N_2P_1K_1$	23.33±2.89 ab	54.34±1.59 ab	49.00±2.22 bc	31.87±1.96 bcd	12.40±0.48 cdef	10.69±0.53 c	16.78±1.13 cd	50.20±0.79 b

3.5 不同氮磷钾肥处理对‘蒙冠 1 号’产量与肥料效应方程的响应

本研究基于三元二次肥料效应方程，以平均单株产量（Y）为因变量，以 N（X_1）、P（X_2）、K（X_3）三元二次多项式的非常数项为自变量，进行多元线性回归分析，得到关系式为：

$$Y=374.054-221.512X_1+55.716X_2+2\,686.010X_3-0.048X_1^2-0.124X_2^2-7.551X_3^2+0.529X_1X_2+0.061X_1X_3-0.685X_2X_3。$$

通过模型分析，以‘蒙冠 1 号’单株产量为经济目标时，施 N 为 0.31 kg/ 株，施 P_2O_5 为 0.46 kg/ 株，施 K_2O 为 0.16 kg/ 株，单株种子产量可达 0.59 kg。氮、磷、钾对‘蒙冠 1 号’平均产量的作用排序为：K ＞ P ＞ N。

4 讨 论

4.1 不同氮磷钾肥处理对‘蒙冠 1 号’Pn 与 PAR 响应关系的影响

光响应曲线模型及其特征参数在揭示作物光合特性方面具有重要作用，可作为评估光合性能强弱的有效工具 [17]。潘越等 [18] 利用 4 种光响应模型对 8 个山葡萄品种的光响应曲线进行拟合，从中筛选出最佳模型和光能利用效率最优的品种。本研究发现，通过 RH、NRH 模型所预测的最大净光合速率普遍大于实测值，这与侯智勇等 [19] 在桉树上的研究结果相似。基于 EX 模型预测的最大净光合速率普遍低于实测值，MRH 模型的预测值与实测值最为吻合，这是由于 EX 模型无法完全捕捉到净光合速率在高光合有效辐射下的光饱和效应，而 MRH 模型对传统双曲线模型的缺陷进行了优化修正，能够更好地模拟净光合速率达到光饱和点的过程，因此该模型对最大净光合速率的预测结果更贴近实测值 [20]。

不同施肥处理显著影响了‘蒙冠 1 号’的光适应幅度（即光饱和点与光补偿点的差值）。其中，常规施氮（$N_2P_2K_2$）相较于高氮肥（$N_3P_2K_2$）和低氮肥（$N_1P_2K_2$）具有更高的最大净光合速率和更低的光补偿点，说明常规氮肥用量下，‘蒙冠 1 号’更能适应变化较大的光照环境，尤其能适应较低光强的环境。低磷肥（$N_2P_1K_2$）相较于常规施磷（$N_2P_2K_2$）、高磷肥（$N_2P_3K_2$），具有更高的光饱和点和更低的光补偿点，光适应幅度最宽（2 038.03 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$）。最大净光合速率和光饱和点均在高钾肥（$N_2P_2K_3$）处理下达到最大，同时

光补偿点较低，说明增施钾肥能有效提高‘蒙冠 1 号’利用弱光和强光的能力。综上，氮肥主要影响中等光强下的光合效率；适度控施磷肥，反而有助于拓宽光适应范围；钾肥则可全面提升植株对不同光强的利用范围与利用效率，作用效果显著。

4.2　不同氮磷钾肥处理对‘蒙冠 1 号’光合作用的影响

光合作用是作物获取养分和能量的关键生理过程，对植物的生长发育至关重要。选育光能利用效率优异的品种，可大幅提升产能，对增产增收起到决定性作用 [21]。本研究发现，常规磷钾处理（$N_2P_2K_2$）下植株净光合速率明显高于低磷钾处理（$N_2P_1K_2$、$N_2P_2K_1$）和高磷钾处理（$N_2P_3K_2$、$N_2P_2K_3$），适度缺乏磷钾肥均会降低叶片净光合速率，而过量施用磷钾肥虽可为植株提供充足养分，但易造成土壤营养配比失衡，进而抑制‘蒙冠 1 号’叶片的净光合速率。蒸腾速率指植物通过气孔向外散失水分的速率，影响水分和养分的运输 [22]。本研究表明，蒸腾速率与净光合速率之间呈显著正相关（$P < 0.05$），说明施肥处理下，‘蒙冠 1 号’气孔开放程度增加，水分和气体交换活跃，促进 CO_2 吸收和光合作用的进行。高氮处理（$N_3P_2K_2$）的水分利用效率较常规施氮（$N_2P_2K_2$）和低磷处理（$N_2P_1K_2$）分别低了 47.33% 和 32.74%，高钾处理（$N_2P_2K_3$）的水分利用效率分别较常规钾处理（$N_2P_2K_2$）和低钾处理（$N_2P_2K_1$）高 51.21% 和 94.59%，这可能是高氮肥加剧叶片水分散失，进而降低水分利用效率，而高钾肥能有效调节气孔的开闭，减少水分的散失 [23]。

4.3　不同氮磷钾肥处理对‘蒙冠 1 号’果实品质的影响

合理施肥是提高果实品质的基础。王天斌等 [24] 研究发现，施用化肥能显著提高文冠果单果质量、单株结果数量和单株种子产量。王冰瑾 [25] 研究发现，低氮处理配施硼肥可显著提高文冠果产量。在高钾肥（$N_2P_2K_3$）处理下，‘蒙冠 1 号’单果种子数最高；常规施肥处理（$N_2P_2K_2$）的单果种子质量、单果质量、果实纵径、果实横径等外观性状指标均最高，而高磷肥处理（$N_2P_3K_2$）能显著提高种子含油率。

4.4　不同氮磷钾肥处理对‘蒙冠 1 号’产量的影响

马勇等 [26] 采用多元逐步回归分析，评估氮、磷、钾对‘北冰红’产量的影响程度。彭少兵等 [27] 采用三元二次肥效方程，研究核桃的最大产量和最佳产量，并计算出所需的氮、磷、钾肥用量。本研究采用三元二次肥料效应模型，对文冠果‘蒙冠 1 号’田间配方施肥试验数据进行拟合分析，构建了适配该试验地的氮磷钾平衡施肥最优模型。模型拟合结果显示：‘蒙冠 1 号’优质高产的最优施肥量为纯 N 0.31 kg/ 株、纯 P_2O_5 0.46 kg/ 株、纯 K_2O 0.16 kg/ 株，在此施肥配比下，文冠果最大产量可达 787.06 kg/hm^2。三元二次肥料效应模型可用于估算文冠果最佳施肥量，可为天山北麓东部文冠果产区的施肥管理提供参考，适宜大面积推广应用。

5　结　论

本研究以 6 年生‘蒙冠 1 号’为试材，分析不同氮磷钾配比对光合特性、果实品质及产量的影响。结果表明，直角双曲线修正模型的预测值最接近实测值，拟合效果最佳；常规氮肥（$N_2P_2K_2$）和高钾肥（$N_2P_2K_3$）分别在不同光强适应性上表现最佳；$N_2P_2K_2$ 处理综合果实品质最优，$N_2P_2K_3$ 处理有利于提高含油率；通过三元二次肥效模型获得最佳施肥量为纯 N 0.31 kg/ 株、纯 P_2O_5 0.46 kg/ 株、纯 K_2O 0.16 kg/ 株，对应最大产量 787.06 kg/hm²，可作为相似立地的参考施肥量。

参考文献：

[1] Xiao J, Sun L, Pan Y N, et al. Multipurpose research from a native woody oil plant *Xanthoceras sorbifolia* in China[J]. Forests, 2023,14:86.

[2] 赵玉红 , 赵明 , 王艳霞 , 等 . 基于 GRA 的干旱半干旱区文冠果新种质综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(3):28-36.
Zhao Y H, Zhao M, Wang Y X, et al. Comprehensive evaluation of *Xanthoceras sorbifolia* new germplasm in arid and semi-arid area based on GRA[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(3):28-36.

[3] 张铁雷 . 文冠果丰产栽培管理技术研究 [J]. 新农民 ,2025(18):58-60.
Zhang T L. Study on high-yield cultivation and management techniques of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[J]. New Farmers, 2025(18):58-60.

[4] 郑保砼 , 于丝浓 , 王改萍 , 等 . 配方施肥对文冠果苗木生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(2):101-111.
Zheng B T, Yu S N, Wang G P, et al. The effect of NPK

proportional fertilization on the growth of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(2):101-111.

[5] Chen Y, Zhou X Z, Ma L N, et al. Chinese yam yield is affected by soil nutrient levels and interactions among N, P, and K fertilizers[J]. Chinese Herbal Medicines,2023,15:588-593.

[6] Wu C Y, Han X Y, Cheng Y, et al. Impact of "3414" fertilization on the yield and quality of greenhouse tomatoes[J]. Open Life Sciences,2024,19:20220893.

[7] 钟建 , 丁昂 , 白平 , 等 . 不同配方施肥对油茶产量及品质的影响 [J]. 四川林业科技 ,2026,47(1):77-84.
Zhong J, Ding A, Bai P, et al. Effects of different formula fertilization on yield and quality of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology,2026,47(1):77-84.

[8] 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.

[9] 叶子飘 . 光合作用对光和 CO_2 响应模型的研究进展 [J]. 植物生态学报 ,2010,34(6):727-740.
Ye Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO_2[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(6):727-740.

[10] 赖帅彬 , 潘新雅 , 简春霞 , 等 . 转苜蓿 *MsOr* 基因烟草光合 - 光响应和光合 -CO_2 响应曲线特征研究 [J]. 草地学报 ,2020,28(1):20-30.
Lai S B, Pan X Y, Jian C X, et al. Characteristics of photosynthetic-light response and photosynthetic-CO_2 response curves in transgenic alfalfa *MsOr* gene tobacco[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020,28(1):20-30.

[11] 康华靖 , 陶月良 , 权伟 , 等 . 植物光合 CO_2 响应模型对光下 (暗) 呼吸速率拟合的探讨 [J]. 植物生态学报 ,2014,38(12):1356-1363.
Kang H J, Tao Y L, Quan W, et al. Fitting mitochondrial respiration rates under light by photosynthetic CO_2 response models[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2014,38(12):1356-1363.

[12] 刘阳阳 , 潘越 , 王世伟 , 等 . 不同山葡萄品种光响应模型拟合及综合评价 [J]. 中国农业科技导报 ,2022,24(2):104-114.
Liu Y Y, Pan Y, Wang S W, et al. Light response model fitting and comprehensive evaluation for *Vitis amurensis*[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2022,24(2):104-114.

[13] 肖妮洁 , 史艳财 , 韦霄 , 等 . 三种藤本药食同源植物光响应模型拟合及光合特性研究 [J]. 热带农业科学 ,2023,43(9):13-21.
Xiao N J, Shi Y C, Wei X, et al. Light response model fitting and photosynthetic characteristics of three vines of medicinal and edible homologous plants[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture,2023,43(9):13-21.

[14] 王娅丽 , 顾志杰 , 贾巧霞 .37 份文冠果优新种质资源表型性状遗传变异分析 [J]. 林业科学研究 ,2022,35(5):52-62.
Wang Y L, Gu Z J, Jia Q X. Genetic variation analysis of phenotypic traits of 37 *Xanthoceras sorbifolium* elite germplasm[J]. Forest Research,2022,35(5): 52-62.

[15] 白玉莹 , 刘艳芬 , 常馨彤 , 等 . 不同种源文冠果种子表型性状与营养品质分析 [J]. 河北林业科技 ,2025(1):8-12,24.
Bai Y Y, Liu Y F, Chang X T, et al. Analysis of phenotypic traits and nutritional quality of different sources of *Xanthoceras sorbifolium* seeds[J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology,2025(1):8-12,24.

[16] Wang X, Chen G D, Du S J, et al. Light intensity influence on growth and photosynthetic characteristics of *Horsfieldia hainanensis*[J]. Frontiers in Ecology and Evolution,2021,9:636804.

[17] 张冲 , 刘芳梅 , 彭铁双 , 等 . 亚热带 4 个水土保持树种幼苗光响应和 CO_2 响应模型拟合 [J]. 湖南林业科技 ,2025,52(2):1-9.
Zhang C, Liu F M, Peng T S, et al. Model fitting of light response and CO_2 response of four subtropical tree species seedlings for soil and water conservation[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2025,52(2):1-9.

[18] 潘越 , 史开奇 , 刘珩 , 等 . 伊犁不同山葡萄品种的光响应模型筛选及光能利用效率评价 [J]. 经济林研究 ,2022,40(1):178-188.
Pan Y, Shi K Q, Liu H, et al. Light response model fitting and light use efficiency evaluation for different *Vitis amurensis* varieties in Yili region[J]. Non-wood Forest Research,2022,40(1):178-188.

[19] 侯智勇 , 洪伟 , 李键 , 等 . 不同桉树无性系光响应曲线研究 [J]. 福建林学院学报 ,2009,29(2):114-119.
Hou Z Y, Hong W, Li J, et al. Study on light response curve of photosynthesis of different *Eucalyptus* clones[J]. Journal of Fujian College of Forestry,2009,29(2):114-119.

[20] 魏炳康 , 李根柱 , 王贺新 , 等 . 软枣猕猴桃的光合模型筛选与光响应特征比较 [J]. 科学技术与工程 ,2021,21(17):7034-7039.
Wei B K, Li G Z, Wang H X, et al. Model selection for fitting photosynthetic light response curves of *Actinidia arguta* and comparisons on photosynthetic light response characteristics[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(17):7034-7039.

（下转第 61 页）

[39] 尹红 , 刘洪滨 , 郭品文 , 等 . 小兴安岭低山区红松生长的气候响应机制 [J]. 生态学报 ,2009,29(12):6333-6341.
Yin H, Liu H B, Guo P W, et al. An analysis on the climatic response mechanism of the growth of *Pinus koraiensis* in the lower mountains of Xiaoxing'anling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(12):6333-6341.

[40] 朱文婷 , 刘海坤 , 何睿 , 等 . 藏东南急尖长苞冷杉群落空间点格局分析及其时空动态 [J]. 生态学报 ,2022,42(22):8977-8984.
Zhu W T, Liu H K, He R, et al. Spatial point pattern analysis and spatio-temporal dynamics of *Abies georgei* var. *smithii* forests in southeast Xizang[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(22): 8977-8984.

[41] 邹贵武 . 竞争影响马尾松 (*Pinus massoniana*) 生长的生态学机制研究 [D]. 杭州 : 浙江大学 ,2022:104-109.
Zou G W. Ecological mechanisms of competition affecting the growth of Masson pine(*Pinus massoniana*)[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2022:104-109.

[42] Frank D, Esper J. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps[J]. Dendrochronologia,2005,22:107-121.

[43] 巢林 , 洪滔 , 李键 , 等 . 不同林龄、径级杉木人工林种内竞争规律 [J]. 浙江农林大学学报 ,2015,32(3):353-360.
Chao L, Hong T, Li J, et al. Intraspecific competition in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different age and diameter classes[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2015, 32(3):353-360.

[本文编校：谢荣秀]

（上接第 18 页）

[21] Li R Q, He Y, Chen J Y, et al. Research progress in improving photosynthetic efficiency[J]. International Journal of Molecular Sciences,2023,24:9286.

[22] Ma J Y, Chen T T, Lin J, et al. Functions of nitrogen, phosphorus and potassium in energy status and their influences on rice growth and development[J]. Rice Science,2022,29(2):166-178.

[23] Akhtar M N, Ul-Haq T, Ahmad F, et al. Application of potassium along with nitrogen under varied moisture regimes improves performance and nitrogen-use efficiency of high-and low-potassium efficiency cotton cultivars[J]. Agronomy,2022,12:502.

[24] 王天斌 , 汪智军 , 靳开颜 , 等 . 新疆奇台地区不同水肥条件下文冠果种实性状的差异 [J]. 经济林研究 ,2024,42(4):109-116.
Wang T B, Wang Z J, Jin K Y, et al. Differences of fruit traits of yellow horn under different water and fertilizer conditions in Qitai region of Xinjiang[J]. Non-wood Forest Research,2024,42(4): 109-116.

[25] 王冰瑾 . 不同肥料配合施用对文冠果生长发育的影响 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2023:32-39.
Wang B J. Effects of different fertilizers on growth of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023:32-39.

[26] 马勇 , 潘越 , 韩政伟 , 等 . 干旱区不同施肥处理对 " 北冰红 " 产量的影响 [J]. 安徽农业科学 ,2024,52(5):181-184.
Ma Y, Pan Y, Han Z W, et al. Effect of different fertilization treatments on the yield of 'Beibinghong' in arid area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2024,52(5):181-184.

[27] 彭少兵 , 成艳霞 , 董文浩 , 等 . 核桃 "3414" 肥料效应试验及推荐施肥量的回归分析 [J]. 经济林研究 ,2018,36(4):27-32.
Peng S B, Cheng Y X, Dong W H, et al. "3414" fertilization tests and regression analysis of recommended fertilizer amount of walnut[J]. Non-wood Forest Research,2018,36(4):27-32.

[本文编校：谢荣秀]