

基于模糊 Borda 组合模型的枸杞 品质水氮调控效应评价

张云亮¹, 马彦麟², 高亚林², 齐广平²,
郑永山¹, 吕隹乐², 汪金文²

(1. 甘肃省农村饮水安全管理办公室, 甘肃 兰州 730046; 2. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为筛选出合适的枸杞(*Lycium barbarum* L.)水氮供应阈值,利用模糊 Borda 组合模型评价了不同水氮组合对枸杞品质的调控效应。以三年生‘宁杞5号’枸杞为对象,分析了4个水分调控水平(以土壤含水量占田间持水量 θ_f 的百分比控制土壤水分上、下限),即充分灌溉 W0(75%~85% θ_f)、轻度水分亏缺 W1(65%~75% θ_f)、中度水分亏缺 W2(55%~65% θ_f)、重度水分亏缺 W3(45%~55% θ_f),和4个施氮水平,即不施氮 N0(0 kg·hm⁻²)、低施氮量 N1(150 kg·hm⁻²)、中施氮量 N2(300 kg·hm⁻²)、高施氮量 N3(450 kg·hm⁻²),对枸杞外观品质和营养品质的影响,并构建模型对枸杞品质进行综合评价。结果表明:(1)同一水分调控下中低量施氮可提高枸杞果果径,较高施氮量提高3.39%~5.19%,随水分亏缺程度加剧枸杞果径呈先增后降变化趋势,其中W0、W1和W2较W3分别提高8.01%、9.44%和6.92%;枸杞果长随施氮量增加呈先增后降变化趋势,N2处理提高最大(4.39%),随水分亏缺程度加剧呈降低趋势,各处理较重度水分亏缺提高2.50%~9.57%;水分调控、施氮水平及二者交互作用均对枸杞果形指数影响不显著。WIN2处理的总糖、多糖、脂肪、维生素C和黄酮含量均最高,分别较其他处理提高了3.32%~16.93%、7.49%~54.72%、6.50%~45.89%、2.29%~47.41%和4.14%~28.34%;W2N3处理的氨基酸含量最高,较其余处理提高了11.12%~86.16%;W0N2处理的蛋白质含量最高,较其他处理提高了7.15%~71.67%;W2N1处理的总酚含量最高,较其他处理提高了8.54%~65.98%。即轻中度水分亏缺、低中施氮量水平时有利于枸杞外观品质和营养品质的形成。(2)各处理枸杞品质的评价价值因模型不同存在明显不一致。剔除主成分分析后,隶属函数分析、灰色关联度分析和TOPSIS模型3种单一模型各自的评价结果与除该单一模型外其余2种模型评价结果的Kendall相关系数通过了Kendall-W协和系数事前检验,具有一定的相容性,可进行组合评价。(3)对均值法和模糊 Borda 评价法构建的组合评价模型进行事后检验发现,模糊 Borda 组合评价模型与各单一模型评价价值的 Spearman 相关系数高于均值法。(4)对基于模糊 Borda 组合评价模型的枸杞品质评价价值进行回归分析得出,水氮供应阈值分别为348.40~385.08 mm和270.46~298.92 kg·hm⁻²时,枸杞的综合品质较优。

关键词:枸杞;水氮调控;外观品质;营养品质;模糊 Borda 组合评价模型

中图分类号:S567.1⁺9;R282.2 **文献标志码:**A

Evaluation of water and nitrogen regulation effects of wolfberry quality based on fuzzy Borda combination model

ZHANG Yunliang¹, MA Yanlin², GAO Yalin², QI Guangping²,
ZHENG Yongshan¹, LV Huile², WANG Jinwen²

(1. Rural Drinking Water Safety Administration Office of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730046; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To determine optimal water and nitrogen supply thresholds for wolfberry (*Lycium barbarum* L.), a fuzzy Borda combination model was used to evaluate the effects of different water and nitrogen combinations on its

收稿日期:2024-07-17

修回日期:2024-09-04

基金项目:国家自然科学基金(51969003, 52069001, 52269009);甘肃省科技重点研发计划项目(22YF7NA110);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-20);兰州市科技计划项目(2022-2-60);甘肃省高等学校创新基金项目(2023A-054);甘肃农业大学“西北旱区特色作物水土资源高效利用创新”学科团队建设专项(GAU-XKTD-2022-09);甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目(24GSLK080)

作者简介:张云亮(1986-),女,甘肃敦煌人,高级工程师,主要从事干旱半干旱区农村水利管理研究。E-mail:453630965@qq.com

通信作者:郑永山(1974-),男,甘肃兰州人,正高级工程师,主要从事农村水利建设管理研究。E-mail:453254195@qq.com

quality. Taking the three-year-old 'Ningqi No. 5' wolfberry as the object, four water control levels (the upper and lower limits of soil water controlled by the percentage of soil water content to field water capacity θ_f) were analyzed. Full irrigation of W0 (75%~85% θ_f), mild water deficit W1 (65%~75% θ_f), moderate water deficit W2 (55%~65% θ_f), severe water deficit W3 (45%~55% θ_f) and 4 nitrogen application levels of no nitrogen application N0 (0 kg·hm⁻²), low nitrogen application rate N1 (150 kg·hm⁻²), medium nitrogen application rate N2 (300 kg·hm⁻²) and high nitrogen application rate N3 (450 kg·hm⁻²) on the appearance quality and nutritional quality of wolfberry were investigated. The results showed that: (1) Under the same water control, the fruit diameter of wolfberry fruit was increased by medium and low nitrogen application, while the fruit diameter of higher nitrogen application was increased by 3.39%~5.19%. The fruit diameter of wolfberry fruit was increased first and then decreased with the increase of water deficit, in which W0, W1 and W2 were increased by 8.01%, 9.44% and 6.92% compared with W3, respectively. The fruit length of wolfberry first increased and then decreased with the increase of nitrogen application, N2 treatment increased the most (4.39%), and decreased with the increase of water deficit, and the severe water deficit of each treatment increased by 2.50%~9.57%. Water regulation, nitrogen application level and their interaction had no significant effect on the fruit form index. The contents of total sugar, polysaccharide, fat, vitamin C and flavonoid in W1N2 treatment were the highest, which were increased by 3.32%~16.93%, 7.49%~54.72%, 6.50%~45.89%, 2.29%~47.41% and 4.14%~28.34% compared with other treatments, respectively. The amino acid content of W2N3 treatment was the highest, which was 11.12%~86.16% higher than that of other treatments. The protein content of W0N2 treatment was the highest, which was increased by 7.15%~71.67% compared with other treatments. The total phenol content of W2N1 treatment was the highest, which was 8.54%~65.98% higher than that of other treatments. The appearance quality and nutritional quality of wolfberry were formed when the water deficit was moderate, and the nitrogen level was low. (2) The evaluation value of wolfberry quality of each treatment was significantly inconsistent due to different models. After removing the principal component analysis, the Kendall correlation coefficient of the evaluation results of the three single models of membership function analysis, grey correlation degree analysis and TOPSIS model and the evaluation results of the other two models except this single model passed the Kendall-W concordant coefficient test, which had certain compatibility and can be combined evaluation. (3) Post-test of the combined evaluation model constructed by the mean value method and the fuzzy Borda evaluation method found that the Spearman correlation coefficient between the fuzzy Borda combination evaluation model and each single model was higher than the mean value method. (4) The regression analysis of the quality evaluation value of wolfberry based on the fuzzy Borda combination evaluation model showed that the comprehensive quality of wolfberry was better when the water and nitrogen supply thresholds were 348.40~385.08 mm and 270.46~298.92 kg·hm⁻², respectively.

Keywords: wolfberry; water and nitrogen regulation; appearance quality; nutritional quality; fuzzy Borda combination evaluation model

枸杞 (*Lycium barbarum* L.) 是茄科枸杞属多年生落叶灌木, 在防风固沙、盐碱地防治和水土保持等方面发挥着重要作用^[1]。此外, 枸杞富含人体所需的多种氨基酸和维生素, 具有丰富的药用价值和保健功能^[2]。在众多环境因素中, 水分和氮肥是影响枸杞品质的重要因子。水分是植物细胞扩张生长的动力, 适宜的土壤水分状况有利于氮素等营养元素的运移、吸收和利用^[3], 促进作物冠根生长, 提高果实多糖、总糖、黄酮等的含量^[4]。氮素是作物形成蛋白质等生物活性物质的重要元素^[5], 溶于水可减少土壤水分无效蒸发, 增强叶片光合作用与运

转效率, 促进果实中氨基酸、维生素、可溶性糖等物质积累^[6]。然而, 水氮供应并非越多越好, 过量的水氮投入会造成枸杞植株根系腐烂、光合作用减弱、产量品质降低及土壤酸化、生产成本增加、资源浪费等一系列问题^[7]。因此, 在枸杞栽培中应控制水氮用量。

评价作物的品质是一个复杂的多属性决策过程。在评价时要综合考虑多重指标, 建立科学、合理的评价体系, 采取行之有效的评价模型, 以达到全面、客观、稳定的评价结果。目前, 国内外已有的多目标评价方法已达数百种, 在农业生产中, 较为

常用的评价模型主要有熵权法^[8]、主成分分析法^[9]、灰色关联度分析法^[10]、隶属函数分析法^[11]和 TOPSIS 模型^[12]等。然而,这些评价模型由于立足点不同,使得提取的“信息源”和“信息量”存在差异,导致评价结果具有片面性,且不同模型的评价结果也不一致^[13]。为此,有学者提出,对不同的评价模型组合排序,建立组合评价模型^[14],可得到更加全面、科学的结果,如:均值法组合评价模型^[15]、模糊 Borda 组合评价模型^[16]等。均值法组合评价模型是将单一评价模型的评价值进行模型组合,在实际应用中简单易懂;模糊 Borda 组合评价模型在评价过程中不仅考虑了单一模型的排序值,还考虑了其评价值,提高了结果的精确性。现阶段,组合评价模型主要应用于统计管理学^[17]等领域,在农业生产领域应用较少。

甘肃引黄灌区是中国第二大枸杞产区。然而,该区降雨稀少、水资源短缺、土壤盐渍化严重,且在枸杞种植中秉持高水高肥出高产的理念,导致产量品质及水肥利用率低下,严重制约着当地农业生态系统的可持续发展及枸杞产业的转型升级^[18]。因此,本文以三年生‘宁杞5号’枸杞为研究对象,研究水氮调控对枸杞外观品质和营养品质的影响,分别采用主成分分析法、灰色关联度分析法、隶属函数分析法和 TOPSIS 模型对枸杞品质进行综合评价,在通过一致性检验的基础上,分别采用均值法和模糊 Borda 法基于单一模型的评价结果构建组合评价模型,并通过事后检验选择最优组合评价模型,最后建立评价值回归模型以获得枸杞综合品质提升的水氮供应阈值,为甘肃引黄灌区枸杞水氮优化管理和提质增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022年5—9月在甘肃省景泰川电力提灌水资源利用中心灌溉试验站(37°12'N、104°05'E)开展。该区属温带大陆性干旱气候,降水少,多年平均降水量为201.6 mm,蒸发量大,多年平均蒸发量为2761 mm,多年平均气温、日照时数、辐射量和无霜期分别为8.6℃、2652 h、 $6.18 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和191 d,平均海拔1572 m,植被覆盖率18.35%。土壤类型为砂壤土,土壤容重为 $1.63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水率为24.10%。试验地0~60 cm土层土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾含量分别为13.20、1.62、1.32、34.03 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和74.51、26.31、173 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH值、全盐含量、碱化度和电

导率分别为8.11、7.38 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、26.56%和2.34 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 。气象数据来源于安装在田间的 Davis 小型气象站,试验期间降水量(84 mm)和平均气温(21.3℃)分布如图1所示。

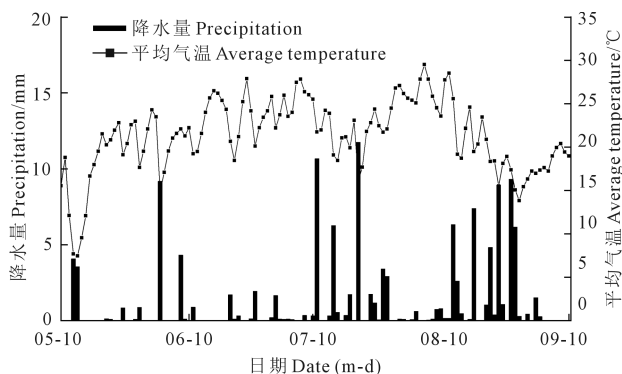


图1 试验期间逐日降水量和平均气温

Fig.1 Daily precipitation and average temperature during the trial stage

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,参考当地生产实践及前人研究结果^[19-20],设水分调控和施氮水平2个因素,水分调控(灌溉计划湿润层深度为60 cm,以土壤含水量占田间持水量 θ_f 的百分比控制土壤水分上下限)包括充分灌溉W0(75%~85% θ_f)、轻度水分亏缺W1(65%~75% θ_f)、中度水分亏缺W2(55%~65% θ_f)和重度水分亏缺W3(45%~55% θ_f);施氮(纯氮,尿素,含氮量46%)水平包括不施氮N0(0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、低施氮量N1(150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、中施氮量N2(300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和高施氮量N3(450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),共16个处理,每个处理重复3次(表1)。氮肥在枸杞营养生长期(五月下旬)、盛花期(六月上旬)和夏盛果期(七月上旬)分别按6:2:2施入;磷肥(过磷酸钙, P_2O_5 ,含量12%)和钾肥(硫酸钾, K_2O ,含量50%)施用量均为130 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (实物量),于每年枸杞萌芽期一次性底施。供试枸杞品种为‘宁杞5号’,于2021年4月上旬定植,株行距1.5 m×3 m,每个小区(76.5 m^2 ,10.2 m×7.5 m)种植4行,每行5棵,共计20棵。试验采用滴灌水肥一体化方式,各小区铺设灌水管,并安装阀门和水表(精度0.0001 m^3)以控制灌水量,灌溉定额见表1。滴灌带流量为2.0 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$,铺设于距枸杞树干15 cm处。于每年4月初进行枸杞剪枝。其他田间管理和病虫害防治与当地农民生产习惯保持一致。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 外观品质 按照《枸杞种质资源描述规范和数据标准》^[21]测定成熟枸杞鲜果的果径(mm)、果长(mm)和果形指数(无量纲)。

表 1 试验设计
Table 1 Experiment design

处理 Treatment	水分调控 Water regulation (% θ_t)	施氮水平 Nitrogen application level ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌溉定额 Irrigation quota/mm
W0N0		0	452.84
W0N1	75~85	150	414.34
W0N2		300	372.16
W0N3		450	392.60
W1N0		0	384.91
W1N1	65~75	150	391.40
W1N2		300	315.41
W1N3		450	333.27
W2N0		0	316.98
W2N1	55~65	150	290.04
W2N2		300	260.52
W2N3		450	274.46
W3N0		0	249.06
W3N1	45~55	150	227.89
W3N2		300	204.69
W3N3		450	215.64

1.3.2 营养品质 参考 GB/T 18672-2014《枸杞》(18672-2014)^[22], 随机选取混合均匀的枸杞干果 50 g, 采用分光光度计法测定总糖含量 ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$), 蒽酮-硫酸法测定多糖含量 ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$), 茚三酮溶液显色法测定氨基酸含量 (%), 考马斯亮蓝 G-250 法测定蛋白质含量 ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$), SOX606 索氏提取仪 (脂肪测定仪) 测定脂肪含量 ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$), 二甲苯萃取比色法测定维生素 C 含量 ($\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$), 分光光度计法测定黄酮 ($\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 与总酚含量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[23]。

1.4 模型构建

参考前人研究成果^[19-20], 本研究的组合评价步骤如下:

(1) 分别采用主成分分析^[9]、隶属函数分析^[8]、灰色关联度分析^[10]和 TOPSIS 模型^[24]对枸杞果实的外观品质和营养品质进行综合评价。

(2) 采用 Kendall 协和系数检验法进行事前检验^[25]。

(3) 采用 Spearman 等级相关系数检验法^[6], 对模糊 Borda 评价模型和均值法 2 种组合评价模型进行事后检验。

1.5 数据分析方法

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理及模型评价; 采用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件进行方差分析、多重比较 ($P < 0.05$) 和相关性分析 ($P < 0.05$); 采用 Origin 2021 Pro 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 水氮调控对枸杞外观品质的影响

2.1.1 果径 水分调控和施氮水平分别极显著和显著影响枸杞果径 ($P < 0.05$), 水氮交互作用对枸杞果径影响不显著 ($P > 0.05$, 图 2A)。同一水分调控下中低量施氮可提高枸杞果实果径。同一施氮水平下, 随水分亏缺程度加剧, 枸杞果径呈先增后降趋势。W1N2 处理的枸杞果径 (10.47 mm) 最大, 较其他处理提高了 2.55%~20.07%; W3N3 处理的枸杞果径 (8.72 mm) 最小, 较其他处理降低了 3.75%~16.71%。

2.1.2 果长 水分调控和施氮水平显著影响枸杞果长 ($P < 0.05$), 水氮交互作用对枸杞果长影响不显著 ($P > 0.05$, 图 2B)。同一水分调控下, 随施氮量增加, 枸杞果长呈先增后降趋势。同一施氮水平下, 随水分亏缺程度加剧, 枸杞果长呈降低趋势, 表现为 $W0 > W1 > W2 > W3$, 其中 W0、W1 和 W2 较 W3 分别提高 9.57%、6.80% 和 2.50%。W0N2 处理的枸杞果长 (20.64 mm) 最大, 较其他处理提高 0.58%~13.47%; W3N3 处理的枸杞果长 (18.19 mm) 最小, 较其他处理降低 0.01%~11.87%。

2.1.3 果形指数 水分调控、施氮水平及二者交互作用均对枸杞果形指数影响不显著 ($P > 0.05$, 图 2C)。不同水氮调控下枸杞的果形指数为 1.93~2.07。

2.2 水氮调控对枸杞营养品质的影响

2.2.1 总糖含量 水分调控和施氮水平极显著影响枸杞总糖含量 ($P < 0.01$), 水氮交互作用对枸杞总糖含量影响不显著 ($P > 0.05$, 表 2)。同一水分调控下, 随施氮量增加, 枸杞总糖含量呈先增后降趋势, 其中 N1、N2 和 N3 较 N0 分别提高 5.72%、7.29% 和 3.97%。同一施氮水平下, 随水分胁迫程度增强, 枸杞总糖含量呈先增后降趋势, 其中 W0、W1 和 W2 较 W3 分别提高 6.26%、8.57% 和 2.12%。W1N2 处理的枸杞总糖含量 ($52.63 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最高, 较其他处理提高 3.32%~16.93%; W3N0 处理的枸杞总糖含量 ($45.01 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最低, 较其他处理降低 1.64%~14.48%。可见, 轻度亏缺灌溉结合中施氮量有利于枸杞总糖含量提高。

2.2.2 多糖含量 水分调控、施氮水平及二者交互作用均极显著影响枸杞多糖含量 ($P < 0.01$, 表 2)。在 W0 和 W1 条件下, N1、N2 和 N3 较 N0 处理的多糖含量分别平均提高 9.17%、1.59% 和 0.20%; 在 W2 条件下, 枸杞多糖含量表现为 N1、N2 和 N3 较 N0

处理分别提高 24.81%、23.29% 和 3.54%; 在 W3 条件下, 枸杞多糖含量表现为 N0、N1 和 N2 较 N3 处理分别提高 2.16%、10.24% 和 9.16%。在 N0 条件下, 枸杞多糖含量随水分胁迫程度增强呈先减后增再减趋势; 在 N1、N2 和 N3 条件下, 枸杞多糖含量随水分胁迫程度增强呈先增加后降低趋势。W1N2 处理的枸杞多糖含量 ($5.74 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最高, 较其他处理提高 7.49%~54.72%; W3N3 处理的枸杞多糖含量 ($3.71 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最低, 较其他处理降低 0.01%~35.37%。因此, 轻度亏缺灌溉和中施氮量有利于枸杞多糖含量提高。

2.2.3 氨基酸含量 水分调控显著影响枸杞氨基酸含量 ($P<0.05$), 施氮水平及水氮交互作用对枸杞氨基酸含量影响不显著 ($P>0.05$, 表 2)。在 W0 和 W3 条件下, 枸杞氨基酸含量在 N2 施氮量下最大; 在 W1 和 W2 条件下, 枸杞氨基酸含量随施氮量增加呈 $N3>N2>N1>N0$ 。在 N0 和 N1 条件下, 枸杞氨基酸含量随水分胁迫程度增强呈减小趋势; 在 N2 施氮量下, 枸杞氨基酸含量随水分胁迫程度增强呈 $W0>W2>W1>W3$; 在 N3 施氮量下, 枸杞氨基酸含量随水分胁迫程度增强呈 $W2>W0>W1>W3$ 。W2N3 处理的氨基酸含量 (10.09%) 最高, 较其他处理提高 11.12%~86.16%; W2N0 处理的氨基酸含量 (5.42%) 最低, 较其他处理降低 0.55%~46.28%。即枸杞氨基酸含量在中度水分亏缺结合高施氮量处理时最高, 在中度水分亏缺结合不施氮处理时最低。

2.2.4 蛋白质含量 水分调控、施氮水平及二者交互作用显著影响枸杞蛋白质含量 ($P<0.05$, 表 2)。相同水分调控下, 随施氮量增加, N1、N2 和 N3 水平的枸杞蛋白质含量较 N0 水平分别平均提高 13.82%、14.22% 和 3.16%。在 N0 水平下, 枸杞蛋白质含量随水分亏缺程度加剧呈先增加后降低趋势, 在 N1、N2 和 N3 水平下, 枸杞蛋白质含量随水分亏缺程度加剧呈降低趋势。W0N2 处理的蛋白质含量 ($13.94 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最高, 较其他处理提高 7.15%~71.67%; W3N3 处理的蛋白质含量 ($8.12 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最低, 较其他处理降低 8.46%~41.75%。可见, 充分灌溉结合中施氮量可显著提升枸杞蛋白质含量。

2.2.5 脂肪含量 水分调控显著影响枸杞脂肪含量 ($P<0.05$), 施氮水平及水氮交互作用对枸杞脂肪含量影响不显著 ($P>0.05$, 表 2)。在 W0 条件下, 枸杞脂肪含量随施氮量增加呈先减后增趋势; 在 W1、W2 和 W3 条件下, 随施氮量增加枸杞脂肪含量呈先增后减变化, 其中, N1、N2 和 N3 较 N0 分别提高 4.35%~15.76%、5.59%~8.94% 和 6.85%~15.07。

同一施氮水平下 (除 N0 施氮量), 随水分亏缺程度加剧, 枸杞脂肪含量呈现先增加后降低的趋势。W1N2 处理的枸杞脂肪含量 ($2.13 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最高, 较其他处理提高 6.50%~45.89%; W3N0 处理的枸杞脂肪含量 ($1.46 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最低, 较其他处理降低 6.41%~31.46%。即轻度水分亏缺结合中施氮量处理时枸杞脂肪含量可显著提升。

2.2.6 维生素 C 含量 水分调控、施氮水平及二者交互作用均极显著影响枸杞维生素 C 含量 ($P<0.01$, 表 2)。相同水分调控下, 枸杞维生素 C 含量表现为 N1、N2 和 N3 较 N0 平均分别提高 13.20%、16.23% 和 7.17%。相同施氮水平下, 枸杞维生素 C 含量表现为 W0、W1 和 W2 较 W3 分别提高 11.77%、30.76% 和 18.69%。W1N1 处理的维生素 C 含量 ($48.07 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最高, 较其他处理提高 2.29%~47.41%; W3N3 处理的维生素 C 含量 ($32.61 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最低, 较其他处理降低 1.75%~32.16%。可见, 轻度水分亏缺和低施氮量处理最利于枸杞维生素 C 含量提升, 而重度水分亏缺和高施氮量处理最不利于维生素 C 含量提升。

2.2.7 黄酮含量 水分调控和施氮水平极显著影响枸杞黄酮含量 ($P<0.01$), 水氮交互作用对枸杞黄酮含量影响不显著 ($P>0.05$, 表 2)。在 W0 条件下, 枸杞黄酮含量随施氮量增加呈增加趋势; 在 W1、W2 和 W3 条件下, 枸杞黄酮含量随施氮量增加呈先增后降趋势。同一施氮水平下, 随水分胁迫程度增强, 枸杞黄酮含量表现为 W0、W1 和 W2 较 W3 平均分别提高 12.06%、15.72% 和 5.25%。W1N2 处理的枸杞黄酮含量 ($58.64 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最高, 较其他处理提高 4.14%~28.34%; W3N0 处理的枸杞黄酮含量 ($45.69 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$) 最低, 较其他处理降低 0.59%~22.08%。综上, 枸杞黄酮含量在轻度水分亏缺结合中施氮量时最高。

2.2.8 总酚含量 水分调控和施氮水平极显著影响枸杞总酚含量 ($P<0.01$), 水氮交互作用对枸杞总酚含量影响不显著 ($P>0.05$, 表 2)。相同水分调控下, 枸杞总酚含量随施氮量增加呈先增后减趋势。在 N0、N2 和 N3 条件下, 枸杞总酚含量随水分胁迫程度增强呈 $W1>W2>W0>W3$; 在 N1 条件下, 枸杞总酚含量随水分胁迫程度增强呈 $W2>W1>W0>W3$ 。W2N1 处理的总酚含量 ($18.49 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 最高, 较其他处理提高 8.54%~65.98%; W3N0 处理的总酚含量 ($11.14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 最低, 较其他处理提高 12.42%~39.75%。即中度水分亏缺和低施氮量时可显著提升枸杞总酚含量。

表 2 水氮调控对枸杞营养品质的影响

Table 2 Effects of water and nitrogen regulation on the nutritional qualities of wolfberry

处理 Treatment	总糖含量 Total sugars content /(g · 100g ⁻¹)	多糖含量 Polysaccharides content /(g · 100g ⁻¹)	氨基酸含量 Amino acids content/%	蛋白质含量 /(g · 100g ⁻¹)	脂肪含量 Fats content /(g · 100g ⁻¹)	维生素 C 含量 Vitamin C content /(mg · 100g ⁻¹)	黄酮含量 Flavones content /(mg · 100g ⁻¹)	总酚含量 Total phenols content /(mg · g ⁻¹)
W0N0	46.42efg	4.69d	6.65def	10.45def	1.93ab	34.13ef	51.83cde	13.15cde
W0N1	49.78bc	5.04bcd	7.93cde	12.90ab	1.79ab	37.06de	52.50bcd	15.83bc
W0N2	49.77bc	5.11bcd	9.08ab	13.94a	1.89ab	40.78bc	52.45bcd	15.08bcd
W0N3	48.89cd	5.12bc	8.65abc	13.01ab	1.94ab	38.48cd	54.78abc	14.49bcd
W1N0	48.66de	3.71f	6.66def	11.64bcd	1.84ab	38.40cd	51.53cde	14.04cd
W1N1	50.94ab	5.34b	6.78def	12.30bc	2.00ab	48.07a	56.21ab	15.24bcd
W1N2	52.63a	5.74a	7.29cde	12.78ab	2.13a	46.97a	58.64a	16.91ab
W1N3	48.86cd	4.26e	8.22bcd	10.77cde	1.92ab	42.57b	52.09bcd	15.75bc
W2N0	45.26fg	3.95ef	5.42g	9.54efg	1.79ab	36.39de	47.59ef	13.29cde
W2N1	47.17def	4.93bcd	6.60def	11.56bcd	1.95ab	40.96bc	52.00bcd	18.49a
W2N2	47.66de	4.87cd	8.18bcd	10.48def	1.90ab	43.57b	50.94cde	15.18bcd
W2N3	47.14defg	4.09ef	10.09a	9.91ef	1.89ab	38.74cd	48.19def	13.80cde
W3N0	45.01g	3.79f	5.45g	8.87fg	1.46b	33.19ef	45.69f	11.14e
W3N1	45.94efg	4.09ef	6.23efg	9.34efg	1.68ab	34.85ef	49.51def	12.72de
W3N2	46.64efg	4.05ef	6.80def	9.06fg	1.59ab	33.97ef	47.64ef	13.42cde
W3N3	45.76efg	3.71f	5.89fg	8.12g	1.56ab	32.61f	45.96f	12.79de
因素 Factor	方差分析 Analysis of variance							
W	**	**	*	**	*	**	**	**
N	**	**	ns	**	ns	**	**	**
W×N	ns	**	ns	*	ns	**	ns	ns

注:不同小写字母表示不同水氮处理下处理间差异显著($P<0.05$)。W 为水分处理,N 为施氮处理,W×N 为二者的交互作用。* * 表示影响极显著($P<0.01$), * 表示影响显著($P<0.05$), ns 表示影响不显著($P>0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments under different water and nitrogen treatments ($P<0.05$). W is water treatment, N is nitrogen application treatment, and W×N is their interaction. * * means extremely significant difference ($P<0.01$), * indicates significant difference ($P<0.05$), ns indicates no significant difference ($P>0.05$), respectively.

2.3 枸杞品质综合评价

2.3.1 基于单一评价模型的枸杞品质综合评价 采用主成分分析模型、隶属函数分析模型、灰色关联度模型和 TOPSIS 模型分别对 16 个处理的枸杞果实外观品质与营养品质进行综合评价(表 3)。4 种模型评价排名相差较大,其排名标准差为 0.00~2.99。

2.3.2 枸杞品质单一评价模型的事前检验 4 种单一评价模型评价结果的 Kendall 相关系数如表 4 所示。各单一模型评价与其他 3 种模型评价间的相关系数均值为 0.722~0.874,表明各单一模型的评价结果之间相关性较强,其中灰色关联度分析模型与其他 3 种模型的相关系数均值最小,为 0.722;隶属函数模型与其他 3 种模型的相关系数均值最大,为 0.874。进一步采用 Kendall-W 协和系数检验法对 4 种单一评价模型进行显著性检验^[26],第一次计算得到 Kendall-W 协和系数 $W=0.436$ ($P<0.01$),则 $\chi^2 = m(n-1)W = 19.61 < \chi_{0.01}^2(15) = 30.578$,不满足事前一致性检验;剔除主成分分析模型后, Kendall-W 协和系数 $W = 0.766$ ($P<0.01$),则 $\chi^2 =$

$m(n-1)W = 34.47 > \chi_{0.01}^2(15) = 30.578$,表明剩余 3 种模型具有相容性,满足事前一致性检验。

2.3.3 组合评价模型构建 在通过单一评价模型事前检验的基础上,采用均值法和模糊 Borda 组合评价模型分别构建各单一评价模型结果的组合评价模型(表 5)。所有处理中,有 8 个处理的评价排名的标准差在 1.0 及以下;5 个处理(W0N3、W1N2、W2N1、W2N2 和 W3N0)的评价排名标准差为 0,表明 2 种组合评价模型的评价结果一致性很强。

2.3.4 组合评价模型的事后检验 对 2 种组合评价模型的排序值与 3 种单一模型的排序值进行 Spearman 相关性分析(表 6)发现,2 种组合评价模型的相关系数均值分别为 0.9116 和 0.9123,表明组合评价模型与各单一评价模型的结果相关性很强。由 Spearman 等级相关系数事后检验(表 7)结果可知,均值法和模糊 Borda 组合评价模型的 t 值均大于 $t_{0.001}$ 的临界值,即 2 种组合评价模型均通过一致性检验,其中模糊 Borda 组合评价模型的 t 值较大,效果较优。

表 3 基于单一评价模型的枸杞品质综合评价结果

Table 3 Comprehensive evaluation results of wolfberry quality based on a single evaluation model

处理 Treatment	主成分分析模型 Principal component analysis model		隶属函数分析模型 Membership function analysis model		灰色关联度分析模型 Grey relational degree analysis model		TOPSIS 模型 TOPSIS model		排名的 标准差 Standard deviation of ranking
	评价价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价价值 Evaluation value	排名 Ranking			
	W0N0	-0.07	9	0.42	9	0.68	13	0.37	
W0N1	0.70	5	0.61	5	0.78	7	0.59	5	1.00
W0N2	1.06	2	0.70	2	0.79	6	0.70	2	2.00
W0N3	0.93	3	0.68	3	0.77	8	0.64	3	2.50
W1N0	-0.22	10	0.38	11	0.74	9	0.38	14	2.16
W1N1	0.83	4	0.66	4	0.81	5	0.61	4	0.50
W1N2	1.49	1	0.82	1	0.84	2	0.71	1	0.50
W1N3	0.22	6	0.51	6	0.85	1	0.54	8	2.99
W2N0	-0.90	14	0.20	14	0.70	11	0.23	13	1.41
W2N1	0.17	7	0.49	7	0.82	3	0.55	6	1.89
W2N2	0.16	8	0.49	8	0.81	4	0.55	7	1.89
W2N3	-0.26	11	0.38	10	0.73	10	0.51	9	0.82
W3N0	-1.31	16	0.09	16	0.64	16	0.07	16	0.00
W3N1	-0.80	12	0.23	13	0.66	14	0.21	14	0.96
W3N2	-0.81	13	0.23	12	0.69	12	0.23	11	0.82
W3N3	-1.19	15	0.14	15	0.66	15	0.12	15	0.00

表 4 单一评价模型序值的 Kendall 相关系数

Table 4 Kendall correlation coefficient of single evaluation model sequence values

模型 Model	主成分分析模型 Principal component analysis model	隶属函数分析模型 Membership function analysis model	灰色关联度分析模型 Grey relational degree analysis model	TOPSIS 模型 TOPSIS model	均值 Mean value
主成分分析模型 Principal component analysis model	1.000	0.967	0.622	0.874	0.866
隶属函数分析模型 Membership function analysis model	0.967	1.000	0.622	0.908	0.874
灰色关联度分析模型 Grey relational degree analysis model	0.622	0.622	1.000	0.644	0.722
TOPSIS 模型 TOPSIS model	0.874	0.908	0.644	1.000	0.857

表 5 基于组合评价模型的枸杞品质综合评价结果

Table 5 Results of combined evaluation model on quality of wolfberry

处理 Treatment	均值法 Average value method		模糊 Borda 组合评价 Fuzzy Borda combination evaluation		排名的 标准差 Standard deviation of ranking
	评价价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价价值 Evaluation value	排名 Ranking	
	W0N0	0.44	11	2.74	
W0N1	0.67	4	18.23	6	1.41
W0N2	0.73	2	24.28	4	1.41
W0N3	0.66	5	18.82	5	0.00
W1N0	0.44	12	2.33	10	1.41
W1N1	0.70	3	30.04	2	0.71
W1N2	0.80	1	53.36	1	0.00
W1N3	0.64	6	27.54	3	2.12
W2N0	0.35	15	0.87	12	2.12
W2N1	0.60	8	11.36	8	0.00
W2N2	0.64	7	12.86	7	0.00
W2N3	0.54	9	1.44	11	1.41
W3N0	0.27	16	0.00	16	0.00
W3N1	0.41	13	0.30	14	0.71
W3N2	0.45	10	0.48	13	2.12
W3N3	0.40	14	0.01	15	0.71

表 6 组合评价模型与单一评价模型的 Spearman 相关系数

Table 6 Spearman correlation coefficients of the combined evaluation model and the single evaluation model

模型 Model	隶属函数 分析模型 Membership function analysis model	灰色关联度 分析模型 Grey relational degree analysis model	TOPSIS 模型 TOPSIS model	均值 Mean value
均值法 Average value method	0.971	0.803	0.963	0.9123
模糊 Borda 组合 评价模型 Fuzzy Borda combination evaluation model	0.953	0.879	0.903	0.9116

表 7 Spearman 等级相关系数事后检验

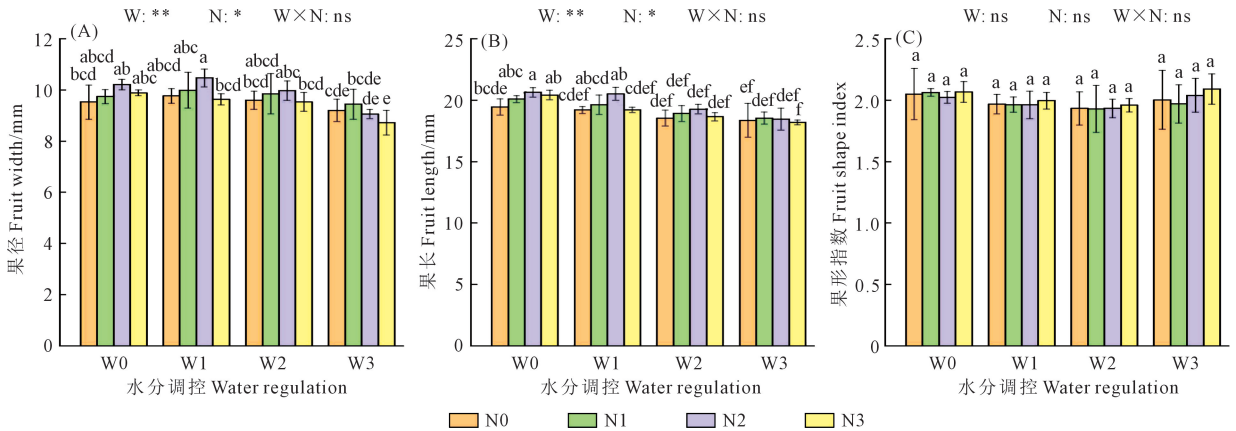
Table 7 Post-test of Spearman rank correlation coefficient

组合模型 Combined model	t 值 t value
均值法 Average value method	16.674
模糊 Borda 组合评价模型 Fuzzy Borda combination evaluation model	41.825
$t_{0.001}$ 的临界值 Threshold of $t_{0.001}$	10.828

2.4 基于模糊 Broda 组合评价模型的枸杞水氮供应回归分析

以施氮量(X_1)和灌水量(X_2)为自变量,基于模糊 Borda 组合评价模型的枸杞品质评价值(Y)为因变量进行回归分析,拟合得出方程: $Y = -0.00115X_1^2 - 3.03314 \times 10^{-4}X_2^2 + 1.96848 \times 10^{-5}X_1X_2 + 0.83961X_1 + 0.16366X_2 - 145.72516$,对其进行显著性检验发现, P

< 0.05 ,且 $R^2 = 0.670$ 。进一步计算得出,灌水量为 366.74 mm 和施氮量为 284.69 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,枸杞综合品质的评价值(31.36)最大;以达到最大评价值的 95%以上为目标(即最大评价值的 95%及以上时所对应的灌水量和施氮量范围),得出水氮供应阈值分别为 348.40 ~ 385.08 mm 和 270.46 ~ 298.92 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。



注:不同小写字母表示不同水氮处理间差异显著($P < 0.05$);W 为水分处理,N 为施氮处理,W×N 为二者的交互作用;** 表示影响极显著($P < 0.01$);* 表示影响显著($P < 0.05$);ns 表示影响不显著($P > 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same figure indicate significant differences between different water and nitrogen treatments ($P < 0.05$). W is water treatment, N is nitrogen application treatment, and W×N is their interaction. ** means extremely significant difference ($P < 0.01$), * Indicates significant difference ($P < 0.05$), ns indicates no significant difference ($P > 0.05$).

图 2 水氮调控对枸杞外观品质的影响

Fig.2 Effects of water and nitrogen regulation on appearance qualities of wolfberry

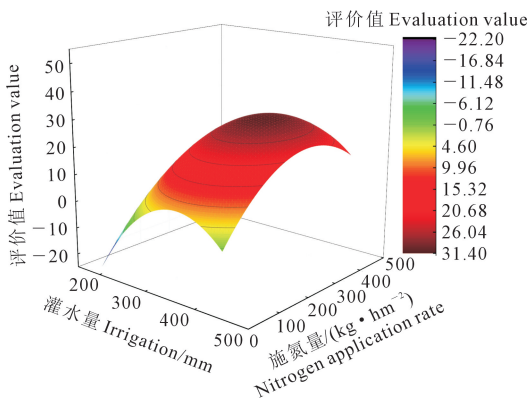


图 3 水氮调控与枸杞品质评价值的回归模型

Fig.3 Regression model of water and nitrogen regulation and quality evaluation of wolfberry

3 讨论

3.1 水氮调控对枸杞品质的影响

品质是衡量枸杞生产效应的重要指标。枸杞外观品种主要包括果径、果长和果形指数,营养指标主要包括总糖、多糖、总酚、黄酮、维生素 C 等。灌水和施氮是影响枸杞品质的重要环境因子^[27]。

本研究发现,同一水分调控下中低量施氮可增大枸杞果实果径,随水分亏缺程度加剧枸杞果径呈先增后降趋势;枸杞果长随施氮量增加呈先增后降趋势,随水分亏缺程度加剧呈降低趋势;果形指数随施氮量增加和水分亏缺程度加剧呈先降低后增加趋势。说明适宜的水氮组合能促进枸杞果实增长。与本研究结果类似,宋娜等^[28]和 Zhang 等^[29]在马铃薯研究中也发现,块茎的淀粉、蛋白质、维生素 C 及氨基酸含量与施氮量呈抛物线关系。这可能是因为适量施氮可提高土壤微生物活性,促进根系对水分和养分的吸收,利于作物生长,进而显著提升果实品质^[30]。本研究表明,随灌水量增加,枸杞总糖和多糖含量呈先增加后降低趋势,这与马波等^[31]在中国宁夏中部干旱地带研究得出枸杞多糖含量在灌水 225 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时最高及李雪峰等^[32]在中国北京研究发现中等灌水条件下樱桃可溶性总糖含量较低灌水和高灌水显著提升的结果相似。说明灌水过多或过少均不利于果实总糖和多糖累积,适当的水分亏缺会优化植株光合产物在营养器官和生殖器官间的分配比例,加快光合产物向生殖器官

转运^[33]。另外,本研究发现,随施氮量和灌水量增加,枸杞脂肪含量呈先增加后降低趋势。这主要是因为灌水施氮过量或不足会抑制光合能力并加剧氧化损伤,不利于游离脂肪酸的合成,最终降低脂肪含量^[34]。本研究表明,W2N1处理的总酚含量最大,较其余处理提高了8.54%~65.98%。这主要是因为适宜的水氮调控可以减少水分的消耗,降低水分对果实的稀释效应,从而提升枸杞品质。

3.2 水氮调控下枸杞品质的综合评价

构建枸杞品质综合评价模型,分析各评价模型对水氮供应的响应,不仅有助于合理利用水氮资源,还可提高枸杞生产水平。本研究采用主成分分析法、隶属函数法、灰色关联度法和TOPSIS法4种单一模型对16个水氮处理的枸杞品质进行综合评价发现,4种模型评价排名相差较大,其排名标准差为0.00~2.99。这主要是由于不同评价方法的出发点和侧重点不同,使得提取的“信息源”和“信息量”存在差异^[6]。在4种评价方法中,隶属函数法的结果与其他3种方法的相关性均值最大,且计算简便,适用于需要快速得到评价结果的情形。本研究通过事后检验发现,模糊Borda组合评价模型的 t 值最大,评价结果最优。这可能是由于该模型计算过程中同时提取了单一评价模型结果的评价值和排序值,且计算简便^[35];均值法与模糊Borda法的结果相近,这可能源于均值法在评价过程中只提取了各单一评价模型结果的评价值,而评价值所包含的信息较多。因而,这2种组合评价模型在农业生产中均推荐使用。此外,在基于模糊Borda组合评价模型的枸杞品质综合评价与水氮用量间的回归方程中,一次项系数为正,二次项系数为负,说明枸杞品质评价随灌水和施氮量增加呈先增加后减小趋势,交互项系数为负,说明水氮之间存在耦合效应,水氮交互有利于提高枸杞品质的综合评价。在生产实践中,应在大量研究的基础上,因地制宜地进行灌水施肥,以最大限度地提升枸杞综合品质。

4 结 论

1)同一水分调控下中低量施氮可提高枸杞果实果径,随水分亏缺程度加剧枸杞果径呈先增后降趋势;枸杞果长随施氮量增加呈先增后降趋势,随水分亏缺程度加剧呈降低趋势;枸杞果形指数随施氮量增加和水分亏缺程度加剧呈先降低后增加趋势。W1N2处理的枸杞总糖(52.63 g·100g⁻¹)、多糖(5.74 g·100g⁻¹)、脂肪(2.13 g·100g⁻¹)、维生素

C(48.07 mg·100g⁻¹)和黄酮含量(58.64 mg·100g⁻¹)均最高,W2N3处理的氨基酸含量(10.09%)最高,W0N2处理的蛋白质含量(13.94 g·100g⁻¹)最高,W2N1处理的总酚含量(18.49 mg·g⁻¹)最高。轻中度水分亏缺、低中施氮量水平时有利于枸杞果实外观品质和营养品质的形成。

2)采用主成分分析、隶属函数分析、灰色关联度分析和TOPSIS模型获得的各处理评价排名不一致,但剔除主成分分析后,各单一模型的评价结果与其他3种模型的Kendall相关系数通过了Kendall-W协和系数事前检验,可进行组合评价。

3)均值法和模糊Borda评价模型与各单一模型评价值的Spearman相关系数均在0.803以上,且模糊Borda组合评价模型的相关系数高于均值法。

4)对基于模糊Borda组合评价模型的枸杞品质评价进行回归分析得出,水氮供应分别为348.40~385.08 mm和270.46~298.92 kg·hm⁻²时,枸杞的综合品质较优。

参 考 文 献:

- [1] 于浩,徐利岗,王怀博.不同水肥耦合对宁夏枸杞生长、产量及品质的影响研究[J].水资源与水工程学报,2023,34(2):208-215,224.
YU H, XU L G, WANG H B. Effects of different water and fertilizer coupling on the growth, yield and quality of *Lycium barbarum* L. in Ningxia[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(2): 208-215, 224.
- [2] 薛晓珍,杨莲.新疆枸杞的营养与利用价值[J].中国食物与营养,2007,(8):49-50.
XUE X Z, YANG L. The main nutrients of *Lycium barbarum* and its utilization[J]. Food and Nutrition in China, 2007, (8): 49-50.
- [3] LI J P, ZHANG Z, YAO C S, et al. Improving winter wheat grain yield and water-/nitrogen-use efficiency by optimizing the micro-sprinkling irrigation amount and nitrogen application rate[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(2): 606-621.
- [4] 娄帅,杨树青,刘月,等.河套灌区代表性地下水盐分与灌水量对枸杞产量及品质的影响[J].农业工程学报,2022,38(22):102-112.
LOU S, YANG S Q, LIU Y, et al. Effects of representative groundwater salinity and irrigation amount on the yield and quality of *Lycium barbarum* in the Hetao Irrigation areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(22): 102-112.
- [5] HAMMAD H M, AHMAD A, WAJID A, et al. Maize response to time and rate of nitrogen application[J]. Pakistan Journal of Botany, 2011, 43(4): 1935-1942.
- [6] 马波,田军仓.枸杞产量和品质水肥效应研究进展[J].节水灌溉,2020,(11):6-11.
MA B, TIAN J C. Advance in research on water and fertilizer effect on yield and quality of *Lycium barbarum* L.[J]. Water Saving Irrigation,

- 2020, (11): 6-11.
- [7] YANG Y, LI X, PAN C, et al. Research progresses on coupling effects of water and nitrogen on growth and grain yield of maize[J]. Water Saving Irrigation, 2021, (5): 41-45.
- [8] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.
- CHENG Q Y. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1228.
- [9] LI F Q, DENG H L, WANG Y C, et al. Potato growth, photosynthesis, yield, and quality response to regulated deficit drip irrigation under film mulching in a cold and arid environment[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 15888.
- [10] KUMAR A, GANDHI C P, ZHOU Y Q, et al. Fault diagnosis of rolling element bearing based on symmetric cross entropy of neutrosophic sets[J]. Measurement, 2020, 152: 107318.
- [11] 马洪英, 靳力争, 李响, 等. 运用隶属函数综合评价 5 个基质培育番茄品种[J]. 天津农业科学, 2016, 22(9): 123-125.
- MA H Y, JIN L Z, LI X, et al. Evaluation on comprehensive characteristics of 5 substrate cultivated tomato varieties by membership function[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(9): 123-125.
- [12] 赵思腾, 师尚礼, 李小龙, 等. 基于熵权-TOPSIS 模型筛选陇中旱作区适宜玉米轮作的土壤可持续系统[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 997-1005.
- ZHAO S T, SHI S L, LI X L, et al. Application of TOPSIS based on entropy weight to screen soil sustainable systems suitable for corn rotation in the arid region of central Gansu[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(4): 997-1005.
- [13] 陈国宏, 李美娟, 陈衍泰. 单一方法评价结论漂移性的测度研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(3): 58-63.
- CHEN G H, LI M J, CHEN Y T. The research on measurement of drift in the evaluation conclusion of single method[J]. Engineering Science, 2004, 6(3): 58-63.
- [14] TSAI W H, LEE P L, SHEN Y S, et al. A combined evaluation model for encouraging entrepreneurship policies[J]. Annals of Operations Research, 2014, 221(1): 449-468.
- [15] 郑健, 宿智鹏, 刘俊彦, 等. 基于养分平衡原理的温室番茄沼液替代氮肥适宜模式及评价[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 77-90.
- ZHENG J, SU Z P, LIU J Y, et al. Suitable model and evaluation of nitrogen fertilizer replacement by greenhouse tomatodigestate based on nutrient balance principle[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(2): 77-90.
- [16] 郭显光. 一种新的综合评价方法——组合评价法[J]. 统计研究, 1995, (5): 56-59.
- GUO X G. A new comprehensive evaluation method-combination evaluation method[J]. Statistical Research, 1995, (5): 56-59.
- [17] WANG W, XIA C H, LIU C F, et al. Study of double combination evaluation of urban comprehensive disaster risk[J]. Natural Hazards, 2020, 104(2): 1181-1209.
- [18] 王晓芳, 夏江宝. 黄河三角洲引黄灌区不同植被类型的降盐改土功能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 141-144, 179.
- WANG X F, XIA J B. Function of reducing soil salinity and soil improvement of different vegetation types in Yellow River irrigation area of the Yellow River delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 141-144, 179.
- [19] 李晓敏, 齐广平, 康燕霞, 等. 枸杞间作红豆草对不同盐渍化土壤水盐运移及产量的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 51-57.
- LI X M, QI G P, KANG Y X, et al. Effects of *Lycium barbarum* intercropping with *Onobrychis viciifolia* on soil water, soil salt transport, and yield of *L. barbarum* in different salinized soils[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 51-57.
- [20] 齐广平, 银敏华, 苏鹏海, 等. 枸杞苜蓿间作模式下水分调控对枸杞光合特性与水分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 242-248, 256.
- QI G P, YIN M H, SU P H, et al. Effects of water regulation on photosynthetic characteristics and water use of *Lycium barbarum* under the mode of intercropping alfalfa and *Lycium barbarum*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 242-248, 256.
- [21] 石志刚, 杜慧莹, 门惠芹. 枸杞种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012: 5-25.
- SHI Z G. Description specification and data standard of *Lycium barbarum* germplasm resources[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012: 5-25.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 枸杞: GB/T 18672-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Wolfberry: GB/T 18672-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [23] 宋仰超. 滴灌条件下柴达木盆地枸杞水氮耦合效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- SONG Y C. Coupling effects of water and nitrogen on wolfberry in Qaidam Basin under drip Irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [24] ZHENG J, QI X Y, FENG L, et al. Effects of NaOH pretreatment on the microbial community and its enzymatic activities in anaerobic digestion of chicken manure and straw[J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2021, 15(6): 826-834.
- [25] 曾宪报. 关于组合评价法的事前事后检验[J]. 统计研究, 1997, 14(6): 56-58.
- ZENG X B. Before and after test on combination evaluation method[J]. Statistical Research, 1997, 14(6): 56-58.
- [26] 洪霞, 胡田田, 刘杰, 等. 基于方法集的番茄营养品质组合评价模型构建及其对水肥供应的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 129-138, 148.
- HONG X, HU T T, LIU J, et al. Construction of comprehensive evaluation model for tomato nutrition quality based on method set and its response to water and fertilizer supply[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 129-138, 148.