

基于水肥耦合的滴灌西兰花光合一产量一品质试验及综合评价

陈华斌¹，田军仓^{1,2,3}，李王成^{1,2,3}，沈 晖^{1,2,3}

(1.宁夏大学土木与水利工程学院,银川 750021;2.宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心,银川 750021;3.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心,银川 750021)

摘要：研究膜下滴灌条件下,不同水肥组合对西兰花光合、产量、水肥利用效率及品质的影响,并建立西兰花产量—品质与水肥因素的回归模型及主成分综合评价体系,寻求西兰花最优的灌水量和施肥量组合,为西兰花高效节水灌溉提质增效提供技术依据。以西兰花为试验作物,采取膜下滴灌的灌溉方式,采用二因素三水平随机区组试验设计。灌水量设置 3 个水平,分别为 1 740,2 175,2 610 m³/hm²,施肥量设置 3 个水平,分别为 1 200,1 500,1 800 kg/hm²,共 9 个处理。结果表明:在生育期降水量为 20.8 mm,灌水量为 2 610 m³/hm²,施肥量为 1 800 kg/hm²,西兰花的产量及品质最好,综合评价得分也最高,说明高水高肥处理下最有利于西兰花的生长,是适宜本地滴灌西兰花的灌溉施肥制度。

关键词：西兰花; 水肥耦合; 非线性回归; 主成分分析

中图分类号：S635.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2021)06-0235-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.032

Experiment and Comprehensive Evaluation of Photosynthesis,
Yield and Quality of Broccoli Under Drip Irrigation
Based on Water and Fertilizer Coupling

CHEN Huabin¹, TIAN Juncang^{1,2,3}, LI Wangcheng^{1,2,3}, SHEN Hui^{1,2,3}

(1.Institute of Civil Engineering and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Ningxia Water Saving Irrigation and Water Resources Control Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021; 3.Engineering Research Center of Ministry of Education of Modern Agricultural Water Resources Utilization in Dry Area, Yinchuan 750021)

Abstract: The effects of different water and fertilizer combinations on the photosynthesis, yield, water and fertilizer use efficiency and quality of broccoli under drip irrigation were studied. The regression model and principal component comprehensive evaluation system of yield quality and water and fertilizer factors of broccoli were established to seek the optimal combination of irrigation amount and fertilizer amount, so as to provide technical basis for improving the quality and efficiency of efficient water-saving irrigation of broccoli. Taking broccoli as the experimental crop, drip irrigation under mulch was adopted, and two factors and three levels randomized block experiment design was adopted. The irrigation amount was set at three levels, which were 1 740, 2 175, 2 610 m³/hm², and the fertilization amount were 1 200, 1 500, 1 800 kg/hm². There were nine treatments. The results showed that in the growth period, the precipitation was 20.8 mm, the irrigation amount was 2 610 m³/hm², and the fertilization amount was 1 800 kg/hm². The yield and quality of broccoli were the best, 2 610 m³/hm² irrigation and 1 800 kg/hm² fertilization, and the comprehensive evaluation score was also the highest, which indicated that the high water and high fertilizer treatment was the most favorable for the growth of broccoli, and it was a suitable irrigation and fertilization strategy for local drip irrigation of broccoli.

Keywords: broccoli; coupling of water and fertilizer; nonlinear regression; principal component analysis

收稿日期:2021-06-01
资助项目:宁夏自治区重点研发计划重大项目“宁夏现代化生态灌区关键技术集成研究与示范”(2018BBF02022);宁夏高等学校一流学科建设
项目(NXYLXK2017A03,NXYLXK2021A03)
第一作者:陈华斌(1993—),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:2502166235@qq.com
通信作者:田军仓(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:slxtjc@163.com

西兰花是中国重要的蔬菜作物之一,种植面积广,经济效益大^[1-3],其营养价值深受广大消费者青睐^[4]。虽然西兰花生长周期短,但水肥需求量大^[5],对灌区的生态环境造成一定影响。灌水量、施肥量是影响植物生长发育的 2 个主要因素^[6-9],灌水量、施肥量合理与否直接影响作物的长势、产量、品质等^[10-14]。合理的水肥使用有利于节水节肥,提升作物的产量和品质^[15-19];相反,不合理的水肥使用会抑制作物的生长,降低作物的产量^[20]。为了提升西兰花水肥利用效率,提高西兰花产量和品质,适宜的灌水量、施肥量亟待确认推广。

Yildirim 等^[21]研究了叶面喷施不同浓度尿素对西兰花品质、生长、矿质元素含量和产量的影响。试验结果表明,喷施 0.61% 和 0.96% 浓度的尿素可使品种“ag3317”“ag3324”的西兰花产量最高分别达到 26 267,22 667 kg/hm²。Yoldas 等^[22]对西兰花施用 0,150,300,450,600 kg/hm² 的氮肥,结果表明,施氮 300 kg/hm² 时西兰花总产量最高为 34 631 kg/hm²,且西兰花花头营养物质最高。赵鹏志^[23]在膜下滴灌条件下,通过西兰花二因素三水平随机区组试验结果表明,高水中肥 W3F2 处理,灌溉定额为 2 175 m³/hm²,纯追肥量为 1 200 kg/hm²,灌水定额为 225 m³/hm²,施肥定额为 200 kg/hm²,灌水次数 8 次,施肥次数 6 次,产量最高为 28 013.40 kg/hm²,且光合指标最好,品质较好。田德龙等^[24]在小麦收获后复种西兰花发现,西兰花灌水量为 1 920 m³/hm² 时增产效应最大,比传统畦灌产量平均提高 15.65%,水分利用效率和氮肥偏生产力平均增加 40.03% 和 15.65%。

目前对滴灌西兰花水肥最优组合的确定多依据生长指标、产量、品质等单指标评价,对于滴灌西兰花多因素多水平多指标综合评价体系的建立鲜有研究,为此本文进行膜下滴灌西兰花不同水肥耦合试验,建立滴灌西兰花多因素多水平多指标的综合评价体系,确定最适合本地种植西兰花的滴灌灌水量和追肥量组合,为西兰花提质增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 4—6 月在宁夏银川市贺兰县永兴村试验基地(106°32'E,38°39'N)进行,试验年平均气温 10.92 ℃,年均日照时间 2 620.50 h,年均降水量 186.40 mm,其中生育期降水量为 20.80 mm。土壤类型为沙壤土,土壤干容重为 1.34 g/cm³ (0—20 cm),pH 8.18,碱解氮含量 51.00 mg/kg,有效磷含量 27.60 mg/kg,速效钾含量 185.00 mg/kg,0—60 cm

土壤田间持水率为 21.18%。

1.2 试验设计和实施

采用随机区组试验设计,设置灌水量、纯追肥量 2 个因子,3 个水平,设计方案见表 1,各处理 3 次重复,灌水和施肥时间根据需水关键期和需肥关键期确定。

表 1 西兰花试验方案设计

处理	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)	纯追肥量/(kg·hm ⁻²)
W1F1	1740	1200
W1F2	1740	1500
W1F3	1740	1800
W2F1	2175	1200
W2F2	2175	1500
W2F3	2175	1800
W3F1	2610	1200
W3F2	2610	1500
W3F3	2610	1800

试验田长 44 m,宽 35 m。每一垄对应 1 个试验处理,每个处理分上、中、下 3 个小区,小区长 11 m,宽 0.8 m,面积为 8.8 m²。供试西兰花品种为“耐寒优秀”,其基肥为友谊复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15),整地覆膜时均匀撒施 300 kg/hm²。西兰花种植方式为温室内育苗,育苗完成移栽至试验田内,3 月 1 日育苗,四叶一心定值,移栽时间 4 月 4 日。收获时间为 6 月 3—10 日。西兰花采取垄上移栽种植,垄面宽 80 cm,垄沟宽 40 cm,垄高 20 cm,每垄上种植 2 行西兰花,垄上覆黑色地膜,株距为 35 cm。西兰花灌溉方式为膜下滴灌,采取二行一管模式,滴灌带直径 16.0 mm,滴头间隔 35 cm,滴头流量 1.6 L/h。采用文丘里施肥器进行水肥一体化随水追肥,肥料为心连心尿素(总氮≥46%)、俄罗斯阿康公司生产的复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 16:16:16),其中低肥为尿素 413 kg/hm²+复合肥 787 kg/hm²,中肥为尿素 515 kg/hm²+复合肥 985 kg/hm²,高肥为尿素 618 kg/hm²+复合肥 1 182 kg/hm²。

1.3 检测指标与方法

(1)光合指标的测定。于 2020 年 5 月 25 日 9:00—16:30,使用便携式光合仪(Li-6800, Li-Cor Inc, Ltd., USA),在每个处理上、中、下各选 1 株正常生长的植株,每株选取外侧最大功能叶,测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间二氧化碳浓度(C_i)。

(2)产量及品质的测定。西兰花采收期每个处理选取上、中、下 3 个小区,小区长为 11 m,采收小区内西兰花,测量其鲜重,并折算成每公顷产量。维生素 C 采用 2,6—二氯酚酚滴定法测定(GB 5009.86—2016),可溶性糖采用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定(NY/T 2742—

2015),可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G—250 染色法测定,可溶性固体采用折射仪法(NY/W1F 2637—2014)测定,硝酸盐采用紫外分光光度法测定。

(3)灌溉水分利用效率计算:

IWUE=Y/W (1)

式中:IWUE 为灌溉水分利用效率(kg/m³);Y 为产量(kg/hm²);W 为灌水量(m³/hm²)。

(4)水分利用效率计算:

WUE=Y/TW (2)

式中:WUE 为水分利用效率(kg/m³);Y 为产量(kg/hm²);TW 为总需水量(m³/hm²)。

(5)偏氮肥生产力计算:

PNP=Y/F (3)

式中:PNP 为偏氮肥生产力(kg/kg);Y 为产量(kg/hm²);F 为施氮肥量(kg/hm²)。

(6)叶片瞬时水分利用效率计算:

LWUE=P_n/E (4)

式中:LWUE 为叶片瞬时水分利用效率(μmol CO₂/mmol H₂O);P_n 为净光合速率(μmol CO₂/(m²·s));E 为蒸腾速率(mmol H₂O/(m²·s))。

1.4 数据处理

数据统计用 Excel 2010 软件,显著性检验和方差分析以及线性回归采用 SPSS 26 软件,相关图形绘制使用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对西兰花光合、产量和品质的影响

2.1.1 不同水肥处理对西兰花光合作用的影响 光合作用的强弱直接反映作物的生长情况^[25]。由表 2 可知,在一定的施肥条件下,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度均随灌水量的增加而增加,叶片瞬时水分利用效率随灌水量的增加而降低。在一定的灌溉条件下,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度及叶片瞬时水分利用效率均随施肥量的增加而增加。

表 2 不同水肥处理对西兰光合作用的影响

处理	净光合速率 P _n / (μmol CO ₂ ·m ⁻² ·s ⁻¹)	蒸腾速率 T _r / (mmol H ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 G _s / (mol H ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间二氧化碳浓度 C _i / (μmol CO ₂ ·mol ⁻¹)	叶片瞬时水分利用效率 LWUE/ (μmol CO ₂ ·mmol ⁻¹ H ₂ O)
W1F1	20.62±1.68bc	9.50±0.51bc	0.4226±0.0185c	246.94±10.08bc	2.76±0.07abc
W1F2	20.15±1.16bc	9.60±0.14bc	0.4425±0.0779bc	247.63±18.06bc	2.61±0.03de
W1F3	21.04±0.81bc	9.80±0.72bc	0.4528±0.0709bc	249.16±2.46bc	2.81±0.06ab
平均值	20.60	9.63	0.4393	247.91	2.73
W2F1	22.46±0.41b	9.40±0.81bc	0.4792±0.0349bc	248.99±9.10bc	2.73±0.01bcd
W2F2	22.44±1.43b	10.10±0.52bc	0.5220±0.0389bc	254.58±10.17bc	2.51±0.01e
W2F3	21.74±0.16b	10.00±0.4b	0.5443±0.0352ab	265.16±10.76abc	2.87±0.12ab
平均值	22.21	9.83	0.5152	256.24	2.70
W3F1	22.69±0.90b	10.40±0.6ab	0.5672±0.0896ab	268.29±0.24ab	2.50±0.05e
W3F2	22.83±0.50b	9.80±0.32bc	0.5656±0.0352ab	272.12±2.67a	2.90±0.04a
W3F3	24.68±0.78a	11.40±0.41a	0.6020±0.0358a	272.13±3.28a	2.64±0.15cde
平均值	23.40	10.53	0.5783	270.85	2.68

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。生育期内降水量为 20.8 mm。下同。

2.1.2 不同水肥处理对西兰花产量和水肥利用率的影响 西兰花的产量直接影响其经济效益,也影响其水分利用效率以及肥料偏生产力^[26]。由表 3 可知,在同一灌溉水平下,产量、灌溉水分利用效率、水分利用效率均随施肥量的增加而增大,而偏氮肥生产力随施肥量的增加而减少。在同一施肥水平下,产量和偏氮肥生产力随灌水量的增加而增加,水分利用效率随灌水量的增加而降低。

2.1.3 不同水肥处理对西兰花品质的影响 西兰花品质的好坏直接决定西兰花的销售情况,影响西兰花的种植热情。从表 4 可以看出,在一定施肥条件下,维生素 C、可溶性糖和可溶性固体质量分数均随灌水量的增加而增加;可溶性蛋白随灌水量的增加而减

少,硝酸盐含量先降低后增加,但可溶性蛋白、硝酸盐含量各处理差距较小。

在一定灌水条件下,维生素 C、可溶蛋白及可溶性固体质量分数均随施肥量的增加呈现先降低后增加的趋势,而可溶性糖和硝酸盐随施肥量的增加先增加后降低。综上所述,水肥耦合可以共同促进西兰花的品质。

2.2 线性回归方程的建立

2.2.1 灌水量、施肥量与产量、灌溉水分利用效率、水分利用效率和偏氮肥生产力的关系 以灌水量 x₁、施肥量 x₂为自变量,产量、灌溉水分利用效率、水分利用效率和偏氮肥生产力为因变量,进行回归分析^[27-29],并检验(表 5)。经回归方程显著性检验 F_{回归}均大于 9.013,相关系数 R²均大于 0.9,回归系数显著

性检验 P 值均小于 0.05,表明根据试验数据建立的回归方程可靠,具有应用价值。

表 3 不同水肥处理对西兰花产量、灌溉水分利用效率、水分利用效率和偏氮肥生产力的影响

处理	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	总需水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌溉水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	总追氮量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	偏氮肥生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
W1F1	19858±830d	1863	10.26±0.47c	10.66±0.96cd	675.00	29.42±1.23c
W1F2	22651±1400cd	1858	12.47±0.81bc	12.19±0.59ab	843.75	26.85±1.66de
W1F3	23556±1733cd	1854	13.34±1.00a	12.71±0.69a	1012.50	23.27±1.71e
平均值	22022	1858	12.02	11.85	843.75	26.51
W2F1	22445±1528cd	2310	9.85±0.70c	9.72±0.38d	675.00	33.25±2.26b
W2F2	25133±19308bc	2282	13.02±0.89a	11.01±0.29bc	843.75	29.79±2.29c
W2F3	25511±1894 abc	2294	14.19±0.87a	11.12±0.52bc	1012.50	25.20±1.87e
平均值	24363	2295	12.35	10.62	843.75	29.41
W3F1	26177±1875abc	2709	9.55±0.72c	9.66±0.56d	675.00	38.78±2.78a
W3F2	26443±1249ab	2725	12.88±0.48ab	9.70±0.80d	843.75	31.34±1.48b
W3F3	27291±1456a	2718	11.19±0.56bc	10.04±1.06cd	1012.50	26.95±1.43de
平均值	26637	2717	11.21	9.80	843.75	32.36

表 4 不同水肥处理对西兰花品质的影响

处理	维生素 C/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	可溶性糖/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	可溶性蛋白/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	可溶性固体 质量分数/%	硝酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
W1F1	611±7.81d	31.80±0.10bcd	5.90±0.06a	8.40±0.15bc	1057±14.29bc
W1F2	626±4.00c	32.00±1.00bcd	5.50±0.06b	8.60±0.21b	1014±7.94c
W1F3	609±8.74d	30.50±0.29cd	5.30±0.10c	8.90±0.26a	1128±16.46a
平均数	615.30	31.40	5.60	8.60	1066.30
W2F1	653±11.24bc	32.00±2.20bcd	5.90±0.30a	8.90±0.20a	1040±19.55bc
W2F2	629±14.74c	35.30±2.29ab	5.60±0.26b	8.60±0.06b	1036±30.73bc
W2F3	650±5.51bc	33.30±3.89abc	5.50±0.10b	8.70±0.15ab	1061±51.86ab
平均数	644.00	33.50	5.60	8.70	1045.70
W3F1	679±18.58b	36.70±3.62ab	5.40±0.12bc	8.80±0.23ab	1040±24.79bc
W3F2	654±10.79bc	36.50±3.34ab	5.20±0.06c	8.50±0.21b	1092±81.71ab
W3F3	719±21.22a	37.30±2.58a	5.90±0.12a	8.90±0.23a	1123±14.05a
平均数	684.00	36.80	5.50	8.70	1085.00

表 5 水肥与产量、灌溉水分利用效率、水分利用效率和偏氮肥生产力的回归关系

因变量	回归方程	R^2	P	$F_{\text{回归}}$
产量	$y_1 = -4512.406 - 4.167x_1 + 32.22x_2 + 0.003x_1^2 - 0.009x_2^2 - 0.001x_1x_2$	0.997	0.006	22753
灌溉水分利用效率	$y_2 = 1.276 - 0.003x_1 + 0.02x_2 + 1.2 \times 10^{-6}x_1^2 - 3.6 \times 10^{-6}x_2^2 - 3.3 \times 10^{-6}x_1x_2$	0.985	0.043	3585
水分利用效率	$y_3 = -0.294 - 0.002x_1 + 0.02x_2 + 1.1 \times 10^{-6}x_1^2 - 3.5 \times 10^{-6}x_2^2 - 3.2 \times 10^{-6}x_1x_2$	0.977	0.049	2742
偏氮肥生产力	$y_4 = 5.229 + 0.023x_1 + 0.004x_2 + 1.1 \times 10^{-7}x_1^2 + 1.7 \times 10^{-6}x_2^2 - 1.1 \times 10^{-5}x_1x_2$	0.987	0.029	2191

产量回归模型中施肥量的二次项系数为负,说明在现行的施肥制度下产量随施肥量的增加先增大后减小。灌溉水分利用效率模型、水分利用效率模型中灌水量一次项均为负值,说明灌溉水分利用效率、水分利用效率均随灌水量的增加而减少。偏氮肥生产力模型,灌水量、施肥量一次项、二次项系数均为正数,说明灌水量、施肥量共同影响偏氮肥生产力(图 1~图 4)。

2.2.2 灌水量、施肥量与西兰花品质的关系 以灌水量 x_1 、施肥量 x_2 为自变量,维生素 C、可溶性糖、可

溶性蛋白、可溶性固体质量分数和硝酸盐为因变量,进行回归分析,并检验(表 6)。经回归方程显著性检验 $F_{\text{回归}}$ 均大于 9.013,相关系数 R^2 均大于 0.9,回归系数显著性检验 P 值均小于 0.05,表明根据试验数据建立的回归方程可靠,具有应用价值。

维生素 C、可溶性糖回归模型中交互项系数均为正值,说明水肥耦合促进西兰花维生素 C、可溶性糖的形成。可溶性蛋白、可溶性固体质量分数回归模型中灌水量、施肥量一次项系数为负数,说明随着灌水

量、施肥量的降低可以提高西兰花可溶性蛋白、可溶性固体的含量。硝酸盐回归模型中,灌水量一次项系数为负数,说明随着灌水量的增加可以有效的减低硝酸盐的含量,相反的施肥量的一次项系数为正数,说明施肥量的增加会增加西兰花中的硝酸盐含量,因此在种植时要合理的使用化肥,不能过度施肥,否则会影响西兰花的品质(图 5~图 9)。

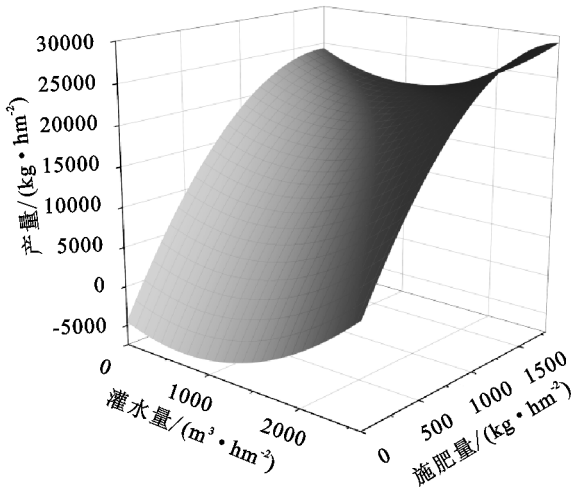


图 1 水肥耦合的产量效应

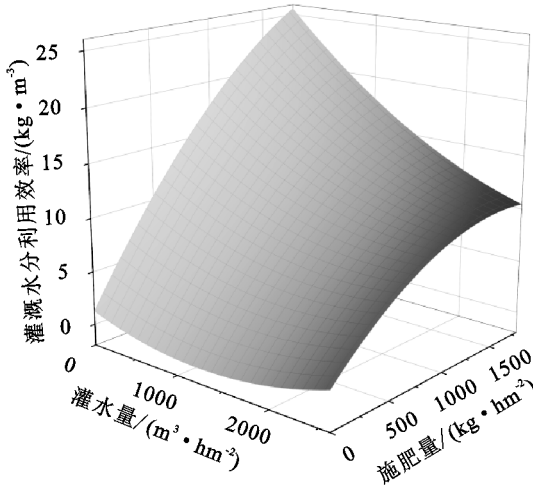


图 2 水肥耦合的灌溉水分利用效率效应

2.3 不同水肥处理下西兰花综合指标的综合评价

相较以往的评价体系,主要集中在单项指标的比

表 6 水肥与维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白、可溶性固体质量分数和硝酸盐的回归关系

因变量	回归方程	R^2	P	$F_{\text{回归}}$
维生素 C	$y_1=275.833+0.139x_1+0.194x_2-4.5\times10^{-5}x_1^2-0.00012x_2^2+8.0\times10^{-5}x_1x_2$	0.964	0.041	10522
可溶性糖	$y_2=22.075-0.013x_1+0.026x_2+3.2\times10^{-6}x_1^2-1.1\times10^{-5}x_2^2+3.6\times10^{-6}x_1x_2$	0.918	0.001	1474
可溶性蛋白	$y_3=7.886-0.002x_1-0.001x_2+4.4\times10^{-7}x_1^2+3.7\times10^{-7}x_2^2-9.6\times10^{-7}x_1x_2$	0.986	0.001	51133
可溶性固体质量分数	$y_4=19.336-0.009x_1-0.001x_2+2.0\times10^{-6}x_1^2+9.3\times10^{-7}x_2^2-5.7\times10^{-7}x_1x_2$	0.980	0.001	14831
硝酸盐	$y_5=863.445-0.243x_1+0.553x_2+4.4\times10^{-5}x_1^2-0.00016x_2^2+2.3\times10^{-5}x_1x_2$	0.994	0.036	108511

以西兰花主要指标产量 X_1 、叶片瞬时水分利用效率 X_2 、灌溉水分利用效率 X_3 、水分利用效率 X_4 、偏氮肥生产力 X_5 、维生素 CX_6 、可溶性糖 X_7 、可溶性蛋白 X_8 、可溶性固体质量分数 X_9 和硝酸盐含量

较上,只能从某一方面得到相应的评价,但对于依照多个评价指标的作物来说,只从单一指标去衡量,无法很好地做出评价。如果评价时一次考虑多个指标将会增大评价的工作量及难度,且不能很好地做出相对客观的评价,不能保证评价指标的准确性。因此采用西兰花的产量、光合、水肥利用效率及品质等相关指标评价西兰花,建立了多项指标的综合评价体系。主要采用主成分分析法^[30-32]对西兰花各个指标进行分析,确定最优的试验处理。

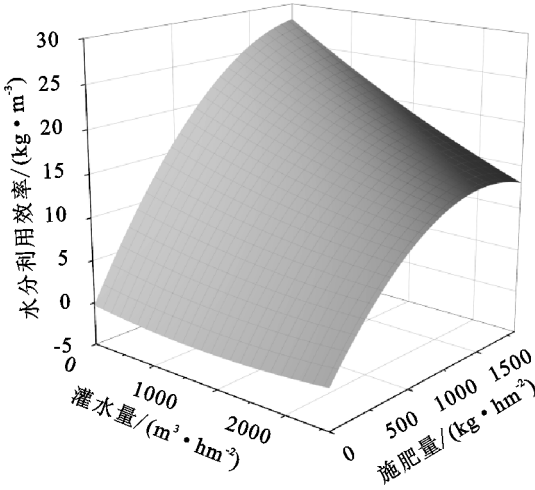


图 3 水肥耦合的水分利用效率效应

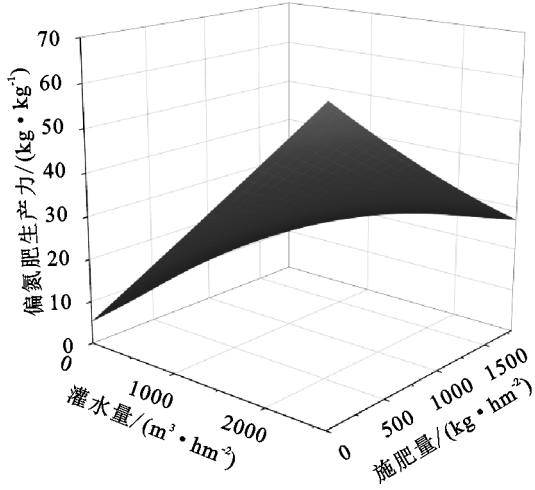


图 4 水肥耦合的偏氮肥生产力效应

X_{10} 为西兰花综合指标的初始数据来源,原始数据通过大田试验实测得到。然后进行主成分分析,对相关数据进行分析,并进行归一化处理,建立西兰花综合指标评价体系。

公因子方差表反映公因子对原始数据的代表性,其中维生素 C、可溶性固体质量分数及水分利用效率分别高达 0.980,0.960,0.958。通过总方差解释表,可以得到主成分 1,2,3 的初始特征值分别为 5.209,2.665,1.070,均大于 1,说明此次提取的主成分为维生素 C、可溶性固体质量分数和水分利用效率,这 3 个指标的累积贡献率达到 89.443%,结果理想,可以比较准确代表西兰花的全部指标。

表 7 为主成分得分系数矩阵,主要因子为维生素 C、可溶性固体质量分数及水分利用效率。

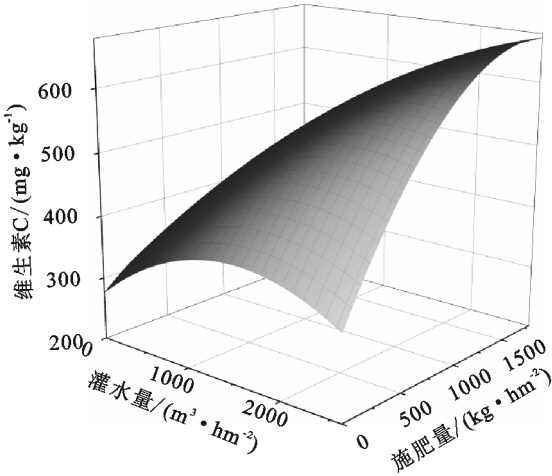


图 5 水肥耦合的维生素 C 效应

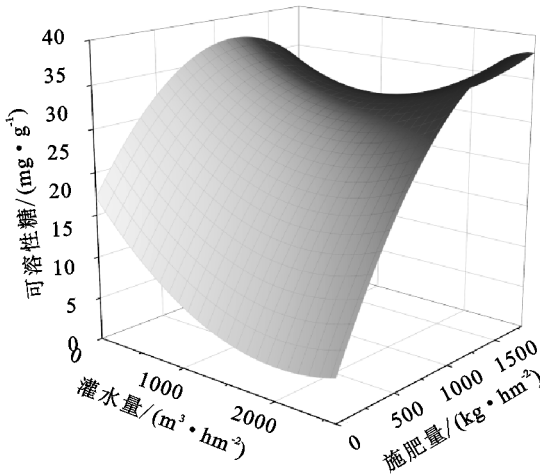


图 6 水肥耦合的可溶性糖效应

完成上述工作后对 10 个指标进行归一化处理,得到归一化系数。

主成分方程为:

$$F_1=0.166X_1-0.025X_2-0.020X_3-0.145X_4+0.085X_5+0.187X_6+0.173X_7+0.185X_8+0.186X_9+0.034X_{10}$$
$$F_2=0.126X_1+0.230X_2+0.322X_3+0.180X_4-0.311X_5+0.034X_6+0.076X_7+0.032X_8+0.053X_9+0.251X_{10}$$
$$F_3=-0.230X_1+0.591X_2-0.359X_3-0.371X_4+0.090X_5-0.138X_6-0.131X_7+0.102X_8-$$

$$0.010X_9+0.460X_{10}$$

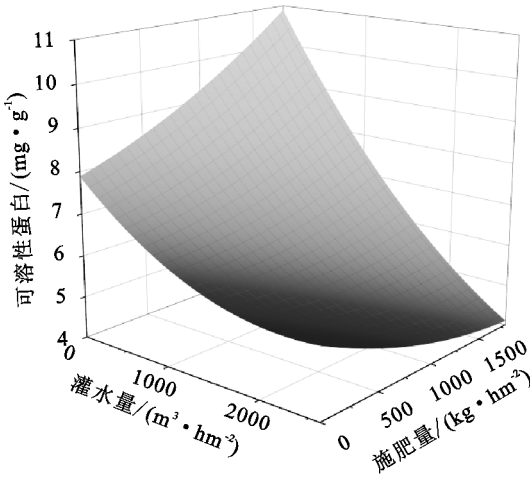


图 7 水肥耦合的可溶性蛋白效应

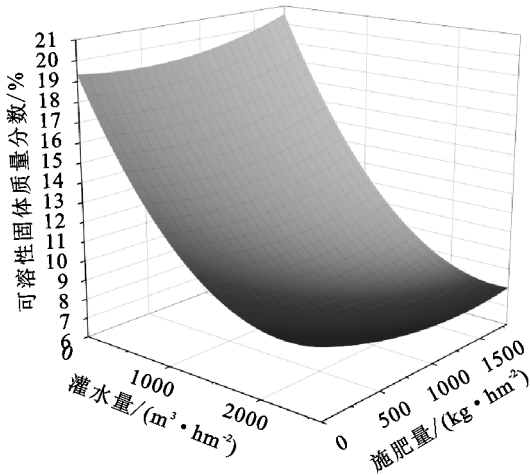


图 8 水肥耦合的可溶性固体质量分数效应

综合评估值: $F=0.52095F_1+0.2665F_2+0.10698F_3$,由第 1、第 2 和第 3 主成分权重与客观权重之积,得到水肥耦合下西兰花品质的综合得分评价见表 8,综合评价值越高,西兰花综合评价越好。

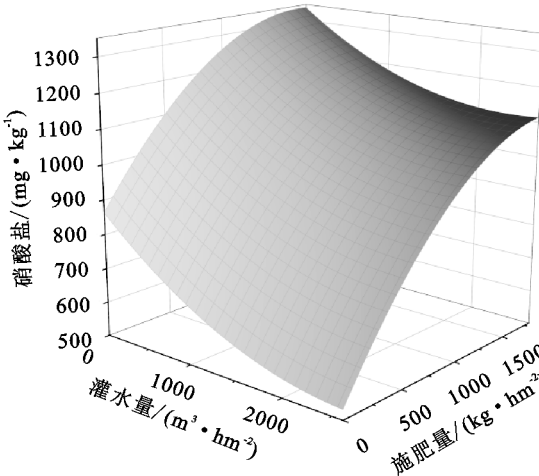


图 9 水肥耦合的硝酸盐效应

从表 8 可以看出,高水高肥处理下的西兰花综合评价得分最高为 0.845 738,说明该处理下西兰花的综合评价最好;而低水中肥处理下西兰花综合评价得

分最低为-0.762 700,说明该处理下西兰花综合评价最差,与上述单项西兰花指标分析结果相同,说明该评价体系的建立满足要求。

表 7 成分得分系数矩阵

项目	成分 1	成分 2	成分 3
产量	0.166	0.126	-0.230
叶片瞬时水分利用效率	-0.025	0.230	0.591
灌溉水分利用效率	-0.020	0.322	-0.359
水分利用效率	-0.145	0.180	-0.371
偏氮肥生产力	0.085	-0.311	0.090
维生素 C	0.187	0.034	-0.138
可溶性糖	0.173	0.076	-0.131
可溶性蛋白	0.185	0.032	0.102
可溶性固体质量分数	0.186	0.053	-0.010
硝酸盐	0.034	0.251	0.460

表 8 综合评价指标

处理	F_1	F_2	F_3	F	排序
W1F1	-1.174030	-0.765820	1.218662	-0.685330	8
W1F2	-1.069350	-0.218620	-1.377460	-0.762700	9
W1F3	-1.334130	1.270278	0.398706	-0.313830	7
W2F1	-0.134740	-1.062220	0.868846	-0.260330	6
W2F2	0.178057	-0.149880	-1.634000	-0.121990	5
W2F3	0.299043	1.194724	-0.319320	0.440019	3
W3F1	0.899989	-1.537620	-0.284920	0.028593	4
W3F2	1.061546	0.681100	0.890816	0.829825	2
W3F3	1.273616	0.588051	0.238667	0.845738	1

3 结 论

(1)在同一灌溉水平下,产量、灌溉水分利用效率、水分利用效率均随施肥量的增加而增大;在同一施肥水平下,产量随灌水量的增加而增加,水分利用效率和偏氮肥生产力随灌水量的增加而降低。在一定的施肥条件下,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度均随灌水量的增加而增加,叶片瞬时水分利用效率随灌水量的增加而降低,在一定的灌溉条件下,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度及叶片瞬时水分利用效率均随施肥量的增加而增加。在一定施肥条件下,维生素 C、可溶性糖和可溶性固体质量分数,均随灌水量的增加而增加;在一定灌水条件下,维生素 C、可溶性蛋白及可溶性固体质量分数均随施肥量的增加呈现先降低后增加的趋势,水肥耦合可以共同促进西兰花的品质。

(2)回归模型的建立较清晰地反映水肥对西兰花指标的影响。

(3)高水高肥处理下的西兰花综合评价得分最高为 0.845 738,说明该处理下西兰花的综合评价最

好;而低水中肥处理下西兰花综合评价得分最低为-0.762 700,说明该处理下西兰花综合评价最差,与上述单项西兰花指标分析结果相同,说明该评价体系的建立满足要求。

综合上述分析,从西兰花的产量、品质、水肥利用效率,综合评价指标来看,在生育期降水量为 20.8 mm、基肥施复合肥 300 kg/hm² 条件下,高水高肥(2 610 m³/hm²,1 800 kg/hm²)西兰花产量和品质最佳。

参考文献:

[1] 高庆生,陈永生,管春松,等.西兰花生产现状、存在的问题及建议[J].蔬菜,2020(11):29-31.

[2] Conversa G, Lazzizera C, Bonasia A, et al. Growth, N uptake and N critical dilution curve in broccoli cultivars grown under mediterranean conditions[J].Scientia Horticulturae,2019,244:109-121.

[3] Slosár M, Uher A, Andrejiová A, et al. Selected yield and qualitative parameters of broccoli in dependence on nitrogen,sulfur, and zinc fertilization[J].Turkish Journal of Agricultureand Forestry,2016,40(3):465-473.

[4] 南占东,于斌武,赵静,等.恩施富硒西兰花产品营养成分分析[J].中国果菜,2020,40(9):46-48.

[5] 邹雪园.滴灌和喷灌施肥技术在大白菜和西兰花上的应用效果[D].武汉:华中农业大学,2018.

[6] 邢英英,张富仓,吴立峰,等.基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J].农业工程学报,2015,31(增刊 1):110-121.

[7] 张建军,党翼,赵刚,等.控释氮肥全量基施对旱地玉米产量形成和水肥利用效率的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):170-177.

[8] 罗勤,陈竹君,闫波,等.水肥减量对日光温室土壤水分状况及番茄产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):449-457.

[9] 杨凡,田军仓,朱和,等.不同滴灌方式及水肥组合对酿酒葡萄光合与产量的影响[J].节水灌溉,2020(11):53-58.

[10] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等.水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2015,48(2):314-323.

[11] 张晶,党建友,张定一,等.节水灌溉方式与磷钾肥减施对小麦产量、品质及水肥利用效率的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):166-171.

[12] 马爱娟,田军仓,马波.不同灌水定额对枸杞光合作用及生长特性的影响[J].节水灌溉,2017(3):36-39.

[13] 刘小刚,孙光照,彭有亮,等.水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J].农业工程学报,2019,35(16):125-133.

[14] 于昕阳,翟丙年,金忠宇,等.有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、水肥利用效率及土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):320-324.

[15] 杨小振,张显,马建祥,等.滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):109-118.

[16] 王连君,王程翰,乔建磊,等.膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J].农业机械学报,2016,47(6):113-119.

[17] 吴立峰,张富仓,范军亮,等.水肥耦合对棉花产量、收益及水分利用效率的效应[J].农业机械学报,2015,46(12):164-172.

[18] 李银坤,郭文忠,薛绪掌,等.不同灌溉施肥模式对温室番茄产量、品质及水肥利用的影响[J].中国农业科学,2017,50(19):3757-3765.

[19] 刘小刚,孙光照,彭有亮,等.水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J].农业工程学报,2019,35(16):125-133.

[20] 胡晓辉,高子星,马永博,等.基于产量品质及水肥利用率的袋培辣椒水肥耦合方案[J].农业工程学报,2020,36(17):81-89.

[21] Yildirim E, Guvenc I, Turan M, et al. Effect of foliar urea application on quality, growth, mineral uptake and yield of broccoli (*Brassica oleracea* L., var. italica)[J]. Plant, Soil and Environment,2007,53(3):120-128.

[22] Yoldas F, Ceylan S, Yagmur B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on yield quality and nutrient content in broccoli[J].Journal of Plant Nutrition,2008,31(7):1333-1343.

[23] 赵鹏志.水肥耦合对贺兰县供港蔬菜光合、品质及产量的影响[D].银川:宁夏大学,2020.

[24] 田德龙,侯晨丽,马鑫,等.膜下滴灌小麦—西兰花复种水肥利用效率[J].干旱地区农业研究,2020,38(4):121-127.

[25] 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2014,30(10):82-90.

[26] 李录山,张国斌,胡云飞,等.水肥耦合对西兰花光合及叶绿素荧光参数的影响[J].安徽农业科学,2015,43(10):9-12.

[27] 蒋静静,屈锋,苏春杰,等.不同肥水耦合对黄瓜产量品质及肥料偏生产力的影响[J].中国农业科学,2019,52(1):86-97.

[28] 戴嘉璐,李瑞平,李聪聪,等.河套灌区节水减肥对玉米不同生育期水分和养分的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):271-277.

[29] 毕舒贻,曹婧,李跃,等.不同水肥组合对苜蓿品质的影响[J].草地学报,2018,26(1):105-113.

[30] 蒋严波,凌忠,韦献东,等.基于主成分分析法的枫香耐铅性及土壤修复潜力研究[J].水土保持学报,2021,35(2):369-376.

[31] 侯裕生,王振华,李文昊,等.极端干旱区滴灌葡萄水肥适宜用量主成分分析法[J].排灌机械工程学报,2021,39(1):89-95.

[32] 王振华,陈潇洁,吕德生,等.水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J].农业工程学报,2020,36(19):66-75.

(上接第 234 页)

[33] 张霞,李鹏,李占斌,等.坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J].农业工程学报,2019,35(7):122-128.

[34] Keesstra S, Pereira P, Novara A, et al. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards[J].Science of the Total Environment,2016,551/552:357-366.

[35] He Q, Dai X A, Chen S Q. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River Headwaters Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J].Journal of Arid Land,2020,12(5):865-886.

[36] Chen H, Zhang X P, Abia M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J].Cate-na,2018,170:141-149.

[37] 吴蕾.黄土高原植被水土保持作用的研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.

[38] 高常军,高晓翠,贾朋.水文连通性研究进展[J].应用与环境生物学报,2017,23(3):586-594.