文章编号:1000-7601(2024)06-0131-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2024.06.14

水肥耦合对娃娃菜叶球养分吸收和土壤理化性质的影响

马彦霞[1],陈静茹[2],王晓巍[1],张玉鑫[1],蒯佳琳[1],张 莉[1],任亚丽[3]

(1.甘肃省农业科学院蔬菜研究所,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃农业大学草业学院,甘肃 兰州 730070;
3.通渭县农业技术推广中心, 甘肃 定西 743300)

摘 要:为探明河西冷凉灌区秋茬娃娃菜节水节肥、高产高效的科学灌溉施肥制度,以‘金皇后’为试材,研究了膜下滴灌条件下 3 个灌溉水平:60%θ_f(低水,H1)、70%θ_f(中水,H2)、80%θ_f(高水,H3)和 3 个施肥水平:N 281-P_2O_5 166-K_2O 383 kg·hm^{-2}(低肥,F1)、N 330-P_2O_5 195-K_2O 450 kg·hm^{-2}(中肥,F2)、N 380-P_2O_5 224-K_2O 518 kg·hm^{-2}(高肥,F3)组合对娃娃菜叶球养分吸收和土壤理化性质的影响。结果表明:水肥用量与娃娃菜田土壤理化性质和叶球氮磷钾吸收量关系密切,H2F2 处理可在一定程度上改善娃娃菜田土壤的理化性质,维持土壤酸碱平衡,提高叶球养分含量,增加养分累积量。水肥耦合模式下,H2F2 处理较 H3F3 处理娃娃菜叶球氮、磷、钾吸收量分别提高 4.72%、3.26%、3.22%。H2F2 处理水平下基于隶属函数与标准差系数权重法取得的水肥耦合效应综合得分最高,且较 H3F3 处理提高 7.13%。综合考虑娃娃菜田土壤理化性质和叶球氮磷钾吸收量,灌水下限控制在 70%θ_f、施肥量 N 330-P_2O_5 195-K_2O 450 kg·hm^{-2}是适合甘肃河西走廊冷凉灌区露地膜下滴灌秋茬娃娃菜最优的水肥管理模式。

关键词:娃娃菜;水肥耦合;养分吸收;土壤理化性质

中图分类号:S634.3 **文献标志码**:A

Effects of water and fertilizer coupling on nutrient absorption and soil physicochemical properties of mini Chinese cabbage

MA Yanxia[1], CHEN Jingru[2], WANG Xiaowei[1], ZHANG Yuxin[1], KUAI Jialin[1], ZHANG Li[1], REN Yali[3]

(1. *Vegetable Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*;
2. *Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*;
3. *Tongwei Agricultural Technology Extension Centre, Dingxi, Gansu* 743300, *China*)

Abstract: The purpose of this study was to explore the scientific irrigation and fertilization system of water saving, fertilizer saving, high yield and high efficiency of autumn crop mini Chinese cabbage in cold irrigation area of Hexi. The mini Chinese cabbage planted in autumn was the research object in the study. ‘Gold Queen’ was used as a test material. The effects of three irrigation water volumes (H1, H2, H3) combined with three fertilizer amounts (F1, F2, F3) on nutrient absorption and soil physicochemical properties of mini Chinese cabbage under drip irrigation were studied. The results showed that the amount of water and fertilizer was closely related to the soil physical and chemical properties and nutrient absorption. The medium water and fertilizer treatment improved the physical and chemical properties of the soil of mini Chinese cabbage field to a certain extent, maintained the soil acid-base balance, and increased the nutrient content of mini Chinese cabbage leaf ball as well as the accumulation of nutrient in the leaf ball. Under the coupling mode of water and fertilizer, the absorption of nitrogen, phosphorus and potassium in the leaf ball of H2F2 treatment was higher than that of H3F3 treatment by 4.72%, 3.26% and 3.22%, respectively. The comprehensive score of water and fertilizer coupling effect obtained by using the membership function of principal component combined with weight was the highest in H2F2 treatment, and 7.13% higher than that

收稿日期:2024-03-07 **修回日期**:2024-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(32060678);甘肃省农业科学院重点研发计划项目(2022GAAS26);甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA761)

作者简介:马彦霞(1982-),女,甘肃定西人,副研究员,主要从事蔬菜栽培与水肥高效利用研究。E-mail:mayx1982@126.com

of high water and high fertilizer treatment, which was the optimal water and fertilizer combination in this experiment. Taking into account the soil's physical and chemical properties and nutrient absorption, an irrigation level of 70% field capacity combined with a fertilizer application of N 330-P_2O_5 195-K_2O 450 kg · hm^{-2} represents the optimal water and fertilizer management strategy for autumn mini Chinese cabbage in the cold irrigation areas of the Hexi Corridor.

Keywords: *Brassica pekinensis*; water and fertilizer coupling; nutrient absorption; soil physicochemical properties

娃娃菜(*Brassica rapa* L.*ssp.Pekinensis*)是结球白菜的一种生态型、半耐寒性蔬菜,具有较高的经济价值。河西走廊高海拔冷凉区丰富的光照资源、变化较大的昼夜温差和干净清朗的灌溉水源为夏秋娃娃菜优质高产提供了得天独厚的条件,近年来娃娃菜产业已成为当地农民脱贫致富、实现乡村振兴的支柱产业[1]。受传统水肥管理习惯的影响,生产中大多数菜农仍延用"大水大肥"管理模式,据统计农户种植娃娃菜的灌水频率为 3~5 d,每次灌水量超 225 m^3 · hm^{-2},施肥频率约 7 d,全生育期施肥量在 650 kg · hm^{-2}以上,导致水肥资源严重浪费,生态环境遭到破坏。目前,甘肃省在河西走廊地区推广的膜下滴灌水肥一体化技术可以通过精准控制灌水量和施肥量来提高水肥利用效率[2],但该项技术在河西走廊起步较晚,生产中缺乏可供娃娃菜应用的水肥管理参数。因此,研究水肥组合对冷凉灌区娃娃菜养分吸收与土壤理化性质的耦合效应,有利于推广科学的水肥管理模式,对提高娃娃菜品质和种植效益具有重要意义。

灌水和施肥是作物生长发育的主要影响因素[3],协调好水肥关系有利于促进植株养分吸收[4],减少水肥流失,改善土壤理化性状[5]。已有研究表明,水分和养分之间存在明显的交互效应[6],水分不足影响肥效发挥,水分过多则导致肥料淋溶[7];而施肥过量或不足均会抑制植物对养分的吸收[8],甚至加剧干旱胁迫[9];水肥配置不合理会导致植物不能充分吸收氮肥和磷肥,使肥料过多积累,产生拮抗效应[10-11]。周亚婷等[12]研究发现,水肥供应对甘蓝氮、磷、钾的吸收影响显著,高肥可提高植株对氮、磷、钾的吸收量,较低的水肥不利于提高植株中氮和钾的累积。邢英英等[13]研究表明,番茄生育期内植株氮、磷、钾吸收量均随灌水量和施肥量的增加而增大,灌水量越大则养分利用效率越低、吸收效率和肥料偏生产力越大;施肥量越大则养分利用效率、吸收效率和肥料偏生产力均减小。秦启杰等[14]研究表明,水肥耦合显著影响紫甘蓝氮、磷、钾的吸收,在田间最大持水量 60%和减肥 20%的水肥组合模式下,紫甘蓝植株吸收氮肥量和钾肥量均最大。缑兆辉等[15]研究发现,在同一灌水下限时,土壤 pH 随施肥量的增加逐渐降低,而土壤全磷、全钾和电导率逐渐升高,土壤全氮含量则呈先降低后升高趋势;在同一施肥水平时,土壤 pH 和电导率均随灌水量的增加呈下降趋势。可见,明确不同灌水施肥水平下作物氮、磷、钾素吸收利用及土壤 pH、电导率和养分含量的相互关系,对指导养分平衡供应、有效吸收利用、改善土壤理化性质具有重要意义。

虽然迄今国内外关于水肥耦合对土壤理化性质及蔬菜养分吸收影响的研究较多,但针对河西走廊冷凉灌区夏秋膜下滴灌娃娃菜水肥耦合对养分吸收及土壤理化性质影响的研究鲜见报道。本研究以冷凉灌区露地膜下滴灌娃娃菜为研究对象,设置不同的灌水下限和施肥水平,研究娃娃菜田土壤理化性质及叶球养分吸收对水肥调控的响应,以期筛选出适合膜下滴灌娃娃菜的最优水肥组合模式,为河西冷凉灌区露地夏秋娃娃菜水肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年 7—10 月在位于河西走廊中部的农业部西北地区蔬菜科学观测实验站(38°26′N,101°92′E)进行。该站地处河西走廊东部、祁连山北麓、阿拉善台地南缘的金昌市永昌县,属温带大陆性气候,是典型的冷凉灌区农业县,具有冬无严寒、夏无酷暑等特点。试验区海拔 1 998 m,年均降水量 156.2 mm,蒸发量 2 067.9 mm,日照时数>2 800 h,年均气温 5.5℃,无霜期 121 d,试验期间的空气温度和降雨量如图 1 所示。试验地前茬种植莴笋,土壤类型为灌漠土,试验前 0~20 cm 土壤的基本理化性质为:pH 值 8.26、电导率 EC 为 0.517 mS · cm^{-1}、有机质 12.97 g · kg^{-1}、全氮 0.65 g · kg^{-1}、碱解氮 108.20 mg · kg^{-1}、全磷 3.02 g · kg^{-1}、速效磷 63.75 mg · kg^{-1}、全钾 81.54 g · kg^{-1}、速效钾 152.86 mg · kg^{-1}、田间持水量 31.10%。

供试娃娃菜品种为'金皇后',供试肥料采用三

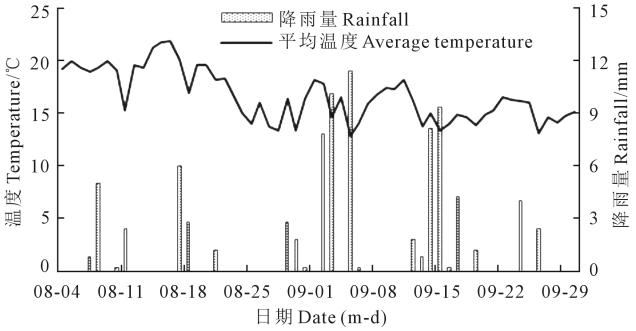


图 1　娃娃菜生育期内降雨量和平均温度的日变化

Fig.1　Diurnal variation of rainfall and average temperature during the growth period of mini Chinese cabbage

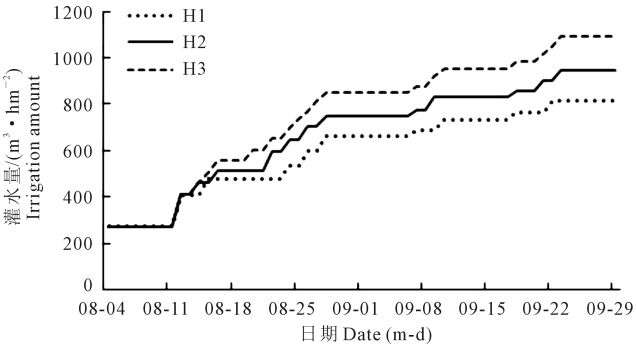


图 2　娃娃菜生育期内不同处理累积灌水量

Fig.2　Cumulative irrigation amount of different treatments during the growth period of mini Chinese cabbage

宁水溶性复合肥(N-P-K:15-15-15)、尿素(N 46%)和硫酸钾(K_2O 51%)。采用膜下滴灌平畦种植模式,畦宽 1.4 m,畦间距 0.2 m。于 7 月 6 日育苗,8 月 4 日定植,9 月 29 日采收。单株定植,株距 20 cm,行距 35 cm,定植密度 12.5 万株·hm^{-2}。

1.2　试验设计

试验设置灌溉和施肥两个因素,A 因素为灌水下限,以课题组 2020 年娃娃菜需水量预备试验结果为基础,设 3 个水平:60%θ_f(低水,H1)、70%θ_f(中水,H2)、80%θ_f(高水,H3),灌水上限统一设定为田间持水量,当土壤含水量降到灌水下限时灌水至上限;B 因素为施肥量,以课题组前期试验结果为基础,设 3 个水平:N 281-P_2O_5 166-K_2O 383 kg·hm^{-2}(低肥,F1)、N 330-$P_2O_5$195-K_2O 450 kg·hm^{-2}(中肥,F2)、N 380-P_2O_5 224-K_2O 518 kg·hm^{-2}(高肥,F3),共 9 个处理,3 次重复。肥料分基肥和追肥,整地时施基肥,氮、磷、钾肥分别占总施肥量的 20%、35%、15%,缓苗结束后(8 月 12 日)随水追施剩余肥量的 10%,莲座期(8 月 24 日)、结球初期(9 月 7 日)和叶球膨大期(9 月 18 日)各追施剩余肥量的 30%。定植后浇透水,缓苗结束统一灌水一次,之后开始试验处理。试验前测定土壤饱和含水量,试验期间用土壤水分监测系统逐日监测各处理田间含水量,每天 8:00 根据采集数据计算灌水量,灌水量(mm)=10×容重(g·cm^{-3})×计划湿润层厚度(cm)×土壤湿润比×(田间持水量-土壤含水量实测值)[16],9:00 开始按需分区浇水。降雨后和灌水前后使用便携式土壤水分速测仪(TDR-150,Spectrum 公司,美国)加测一次土壤含水量。娃娃菜生育期内灌水和施肥情况如图 2 所示。

1.3　测定项目及方法

1.3.1　土壤理化性质和养分含量　娃娃菜采收前(9 月 28 日)采用交叉线五点取样法采集娃娃菜根茎周围土壤,取样深度为 0~20 cm,各小区设置 10 个取样点。土壤样品自然晾干后过 0.25 mm 网筛,测定土壤 pH、EC 及主要养分含量,其中土壤 pH 和 EC 测定参照刘祖汀等[17]方法,主要养分含量参照鲍士旦[18]方法测定,全氮用半微量凯氏法,碱解氮采用碱解扩散法,全磷用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法,速效磷用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,全钾用氢氧化钠熔融—火焰光度法,速效钾用乙酸铵提取—火焰光度法,有机质用重铬酸钾容量法。

1.3.2　娃娃菜叶球养分含量　娃娃菜成熟后采集不同处理具有代表性的娃娃菜 5 株,取其地上部分 105℃杀青 30 min,而后 85℃烘干至恒重后称重并粉碎,参照鲍士旦[18]方法测定可食用部分全氮、全磷和全钾含量,其中全氮用高氯酸—硫酸消煮、蒸馏法测定,全磷用高氯酸—硫酸消煮、磷铝蓝比色法测定,全钾用高氯酸—硫酸消煮、火焰光度计法测定。

1.4　数据统计与分析

植株地上部吸氮/磷/钾量(kg·hm^{-2})=地上部干物量(kg·hm^{-2})×地上部氮/磷/钾浓度(g·kg^{-1})/1000[19],通过主成分分析计算不同水肥处理综合指标值。

$$F_i = a_{1i}X_1 + a_{2i}X_2 + \cdots + a_{ni}X_n \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{1}$$

$$F = a_1F_1 + a_2F_2 + \cdots + a_iF_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{2}$$

$$\mu(X_j) = \frac{(X_j - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \tag{3}$$

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=a}^{n} P_i} \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{4}$$

$$D = \sum_{i=1}^{n} [\mu(X_i) \times W_i] \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{5}$$

式中，F_i表示第 i 主成分得分；F 表示水肥耦合效应综合得分值；a_i为第 i 个主成分的方差百分比；a_{1i}、a_{2i}、…、a_{ni}表示第 i 主成分的各单一指标的特征值所对应的特征向量；X_n 为各单一指标标准化值；$\mu(X_j)$表示某一指标第 j 个处理的隶属函数值；X_j表示某一指标第 j 个处理的平均值；X_{max}和 X_{min}分别表示某一指标所有处理的最大值和最小值；D 表示水肥耦合效应综合评价值；W_i为第 i 个主成分的权重；P_i为第 i 个主成分的贡献率[20-21]。

采用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行整理和统计分析，利用 SPSS 23.0 进行方差分析和主成分分析，采用 Origin 22.0 进行数据相关性分析和作图。

2 结果与分析

2.1 水肥处理对娃娃菜菜田土壤 pH 和 EC 的影响

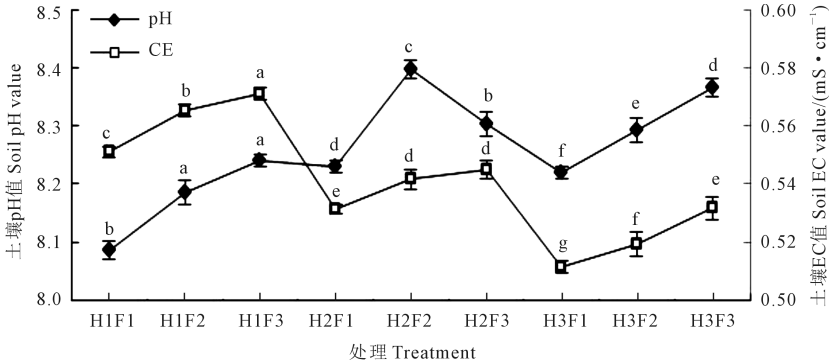
从图 3 可以看出，土壤 pH 和 EC 值在同一灌溉水平下随着施肥量的增加均逐渐升高，在同一施肥水平下随着灌水量的增加均呈下降趋势。水肥耦合模式下，土壤 pH 值在 H1F3 处理下最大、H1F2 处理次之、H3F1 处理最小，但 H1F3 与 H1F2 处理间无显著差异，H3F1 处理与其他处理间均达到差异显著水平。采收时 H1F3 处理土壤 EC 值显著高于其他处理、H3F1 处理显著低于所有处理。

2.2 水肥处理对娃娃菜菜田土壤养分含量的影响

表 1 显示了不同水肥耦合处理对土壤养分含量的影响，随着施肥量的增加，土壤有机质在不同灌水水平处理下均逐渐升高；随着灌水量的增加，有机质在不同施肥水平下均逐渐下降；水肥交互作用下，土壤有机质在 H1F3 处理下最大、H2F3 处理次之、H3F1 处理最小，H1F3 处理较 H3F1 处理提高 6.82%。同一灌水条件下，土壤全氮、全磷和全钾含量均随施肥量的增大呈上升趋势，同一施肥量处理水平下，土壤全氮、全磷和全钾含量均随灌水量的增大而降低；水肥交互作用下，H1F3 处理土壤全氮、全磷和全钾含量均最高，但 H1F3 处理与 H1F2 和 H2F3 处理间均无显著差异。水肥耦合模式下，不同处理土壤碱解氮含量表现为 H1F3 > H1F2 > H2F3 > H2F2 > H3F3 > H3F2 > H1F1 > H2F1 > H3F1，H1F3 和 H1F2 处理分别较 H3F1 处理增加 31.88% 和 21.90%。土壤速效磷在同一灌水量水平下随施肥量的升高而升高，在同一施肥量水平下随灌水量的升高而降低；低水高肥交互处理（H1F3）土壤速效磷含量高于其他处理，其含量较高水低肥处理（H3F1）增加 34.71%。土壤速效钾含量的变化趋势与速效磷基本一致，水肥交互作用下 H1F3 处理速效钾含量最高，但与 H1F2 和 H2F3 处理间无显著差异。

2.3 水肥处理对娃娃菜叶球养分吸收的影响

不同水肥耦合处理对娃娃菜叶球养分含量及其吸收量列于表 2。娃娃菜叶球全氮、全磷、全钾含量及其吸收量在 H1 和 H2 处理水平下均随施肥量的增大呈先升高后降低趋势，在 H3 水平下随施肥量的增加呈逐渐升高趋势。随着灌水量的增加，叶球全氮含量及氮素吸收量在 F1 和 F2 处理水平下先升高后降低，而在 F3 处理条件下逐渐升高；同一施肥量处理下，叶球全磷含量随灌水量的增加呈先升高后降低趋势；叶球全钾和磷素及钾素吸收量在 F1 和 F2 处理水平下随灌水量的增加逐渐升高，而在 F2 处理水平下则随灌水量增大呈先升高后降低趋势。水肥互作条件下，叶球全氮、全磷和全钾含量及氮磷钾素吸收量均在 H2F2 处理条件下达到最高，且与其他处理间达到差异显著水平；叶球全氮、全磷及其氮、磷吸收量均在 H1F1 处理最小，分别较 H2F2 处理降低了 16.01%、38.26%、3.30%、28.91%；叶球全钾及其吸收量均在 H1F3 处理最小，分别较 H2F2 处理降低了 6.76%、31.14%。



注：不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著，下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

图 3 不同水肥处理对土壤 pH 和 EC 的影响

Fig.3 Effects of different water and fertilizer treatments on soil pH and EC

表 1　不同水肥组合处理对土壤养分含量的影响

Table 1　Effects of different water and fertilizer combinations on soil nutrient content

处理 Treatment	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	全氮 Total N /(g·kg^{-1})	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen /(mg·kg^{-1})	全磷 Total P /(g·kg^{-1})	速效磷 Available P /(mg·kg^{-1})	全钾 Total K /(g·kg^{-1})	速效钾 Available K /(mg·kg^{-1})
H1F1	13.26±0.083c	0.650±0.010c	110.8±1.107e	3.113±0.018d	55.0±0.847e	92.9±0.790bc	180.8±0.823cd
H1F2	13.48±0.045ab	0.723±0.015ab	121.1±1.625ab	3.184±0.014ab	62.8±1.025ab	94.6±0.564ab	184.2±1.046ab
H1F3	13.55±0.079a	0.727±0.015a	123.2±1.339a	3.198±0.005a	63.2±0.777a	95.8±1.079a	185.8± 1.187a
H2F1	12.83±0.022d	0.567±0.021d	95.9±1.625 f	3.054±0.022e	50.7±1.333f	86.2±1.191d	174.0±0.995e
H2F2	13.44±0.057b	0.707±0.035ab	118.3±1.710bc	3.149±0.016c	61.4±0.818b	94.2±1.412ab	182.7±1.784bc
H2F3	13.51±0.063ab	0.710±0.010ab	119.7±1.408b	3.167±0.007abc	62.2±0.938ab	94.4±1.319ab	184.4±1.497ab
H3F1	12.69±0.041e	0.533±0.025d	93.5±2.215f	3.039±0.020e	46.9±0.785g	81.1±0.565e	171.5±1.426e
H3F2	13.22±0.031c	0.650±0.036c	114.2±2.514d	3.137±0.018cd	59.8±0.474c	91.4±1.756c	179.8±1.813d
H3F3	13.30±0.036c	0.683±0.021bc	116.3±1.710cd	3.161±0.020bc	58.0±0.630d	92.8±1.080bc	181.3±2.030cd

注:同列不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

表 2　不同水肥组合处理对娃娃菜养分吸收的影响

Table 2　Effects of different water and fertilizer combinations on nutrient absorption of mini Chinese cabbage

处理 Treatment	全氮 Total N /(g·kg^{-1})	氮吸收量 N absorption /(kg·hm^{-2})	全磷 Total P /(g·kg^{-1})	磷吸收量 P absorption /(kg·hm^{-2})	全钾 Total K /(g·kg^{-1})	钾吸收量 K absorption /(kg·hm^{-2})
H1F1	7.010±0.030h	50.64±1.057f	6.470±0.014e	46.74±1.098e	26.44±0.028d	191.0±4.578f
H1F2	7.313±0.025g	54.09±0.639e	6.489±0.016e	48.00±0.721e	26.83±0.022c	198.5±3.152e
H1F3	7.273±0.021g	52.79±0.220e	6.474±0.014e	46.99±0.155e	26.21±0.026e	190.2±0.407f
H2F1	7.737±0.032e	59.98±2.128d	6.559±0.014d	50.85±1.743d	26.67±0.017c	206.8±7.008d
H2F2	8.347±0.049a	82.02±1.042a	6.691±0.013a	65.75±1.073a	28.11±0.074a	276.2±5.553a
H2F3	8.090±0.040c	74.55±2.262c	6.664±0.016b	61.41±2.109c	27.78±0.182b	256.0±7.525c
H3F1	7.450±0.035f	59.23±1.486d	6.486±0.009e	51.57±1.034d	26.71±0.053c	212.3±4.742d
H3F2	7.943±0.032d	75.57±0.435c	6.634±0.014c	63.12±0.670b	27.94±0.168ab	265.8±1.397b
H3F3	8.180±0.036b	78.32±1.934b	6.651±0.007bc	63.67±1.427b	27.95±0.059ab	267.6±5.446b

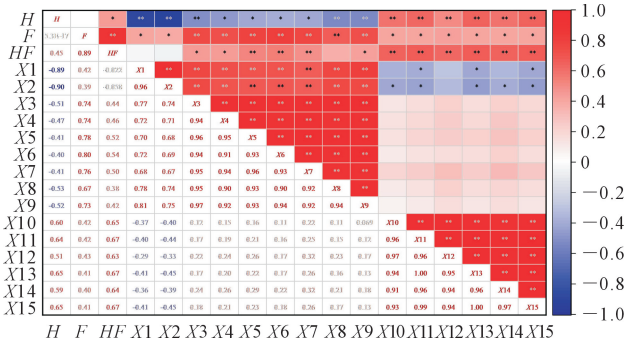
2.4　水肥施用量与土壤理化性质和叶球养分吸收量的相关性分析

通过不同水肥耦合处理对土壤理化性质和叶球养分吸收指标的相关性分析表明(图 4),各指标间存在不同程度的相关性,灌水量与植株全氮、氮素吸收量、植株全磷、磷吸收量、植株全钾和钾吸收量呈正相关关系,与其他指标呈显著负相关关系;施肥量与植株全磷和全钾呈显著正相关关系,与其他指标均呈极显著正相关关系;水肥交互与土壤全氮、土壤碱解氮、土壤全磷、土壤速效磷、植株全氮、氮吸收量、植株全磷、磷吸收量、植株全钾和钾吸收量均呈极显著正相关关系,与土壤 pH、土壤 EC、土壤有机质、土壤全钾和速效钾呈显著正相关关系。水肥交互作用下,不同指标相关系数的绝对值表现为植株全氮>氮吸收量>钾吸收量>磷吸收量>植株全钾>植株全磷>土壤碱解氮>土壤全磷>土壤全氮>土壤速效磷>土壤全钾>有机质>土壤速效钾>土壤 EC>土壤 pH,说明植株全氮与水肥施用量的相关性最大。各指标的相关系数在灌水条件下最大的是植株全氮、植株全钾、氮吸收量、钾吸收量,而土壤碱解氮、土壤全磷和土壤全氮在施肥条件下最大。可见,各项指标响应水肥的敏感性存在显著差异,说明土壤理化性质和叶球养分吸收量对水肥响应的重要程度不同,需要进一步采用多元分析方法进行综合评价。

2.5　基于土壤理化性质及娃娃菜养分吸收的水肥耦合综合评价

土壤理化性质及娃娃菜养分吸收量由多个指标组成,且各指标具有不同的差异性和相关性,直接进行综合评价会产生信息重复,影响评价结果。因此,利用主成分分析法将具有相关性的指标组合成一组新的互无关联的综合指标,再进行综合评价,可提高评价的可靠性[22]。利用主成分分析法对不同水肥处理土壤的理化性状和叶球养分吸收量指标进行分析(表 3),根据主成分因子累积贡献率大于 80%的准则提取了两个主因子,从而将 15 个单

项指标转化为两个新的相互独立的综合指标，方差累积贡献率 94.87%，其中第 1 主成分特征值 8.039，贡献率 53.593%，载荷系数绝对值较大的指标包括土壤 pH、EC、土壤有机质、土壤全氮、土壤碱解氮、土壤全磷、土壤速效磷、土壤全钾和土壤速效钾；第 2 主成分特征值 6.192，贡献率 41.28%，载荷系数绝对值较大的指标包括植株全氮、氮吸收量、植株全磷、磷吸收量、植株全钾和钾吸收量。



注：图中 *H*、*F*、*HF*、*X*1、*X*2、*X*3、*X*4、*X*5、*X*6、*X*7、*X*8、*X*9、*X*10、*X*11、*X*12、*X*13、*X*14、*X*15 分别表示灌水量、施肥量、水肥互作、土壤 pH、土壤 EC、土壤有机质、土壤全氮、土壤碱解氮、土壤全磷、土壤速效磷、土壤全钾、土壤速效钾、植株全氮、氮吸收量、植株全磷、磷吸收量、植株全钾、钾吸收量。＊和＊＊分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上影响显著。

Note: *H*, *F*, *HF*, *X*1, *X*2, *X*3, *X*4, *X*5, *X*6, *X*7, *X*8, *X*9, *X*10, *X*11, *X*12, *X*13, *X*14, and *X*15 represents irrigation, fertilization, water-fertilizer interaction, soil pH, soil EC, organic matter, soil total nitrogen, soil available nitrogen, soil total phosphorus, soil available phosphorus, soil total potassium, soil available potassium, plant total nitrogen, nitrogen absorption, plant total phosphorus, phosphorus absorption, plant total potassium, and potassium absorption, respectively. ＊ and ＊＊ represents significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively.

图 4 水肥施用量与土壤理化性质和叶球养分吸收量的相关性标记热图

Fig.4 Correlation marker heat map of water and fertilizer amount with soil physicochemical properties and nutrient absorption

利用 SPSS 软件计算娃娃菜各指标主成分的特征向量，并对各单项指标的数值进行标准化，标准化后的数据代入式(1)，计算出水肥处理的综合指标得分值 *F*1 和 *F*2，第 1 主成分和第 2 主成分对应的因子得分值中排名第 1 位的分别是 H2F3 和 H2F2 处理。由各主成分的方差百分比和主成分得分，利用式(2)计算不同水肥处理的综合得分值(*F*)。利用公式(3)计算所有指标隶属函数值，并根据主成分分析结果，分别计算两个主成分所对应指标的平均隶属函数值 $\mu(X_1)$ 和 $\mu(X_2)$。利用公式(4)计算两个主成分的权重，分别为 78.43%、21.57%。由各主成分平均隶属函数值和权重，利用公式(5)计算各处理的综合评价得分值(*D*)。根据各处理的 *F* 值和 *D* 值进行水肥耦合效应高低排序，*F* 值和 *D* 值越大，表明水肥耦合模式最优。由表 4 可知，相同灌水量处理下，随着施肥量的增加低水处理综合得分逐渐升高，而中水和高水处理均呈先升高后降低趋势；同一施肥水平下，*F* 值和 *D* 值随着灌水量的增加呈先升高后降低趋势；水肥耦合模式下，综合得分排在前三位的分别是 H2F2、H2F3 和 H3F3 处理，排在后三位的分别是 H3F1、H2F1 和 H1F1 处理。

表 3 主成分的特征值、贡献率和累积贡献率

Table 3 Eigenvalue, contribution rate and cumulative contribution rate of principal components

主成分 Principal component	第 1 主成分 Principal component 1	第 2 主成分 Principal component 2
特征值 Eigenvalue	8.039	6.192
贡献率 Contribution rate/%	53.593	41.280
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	53.593	94.873

表 4 不同处理的综合指标得分值及综合评价值

Table 4 Values of comprehensive index and comprehensive evaluation of different treatments

处理 Treatment	主成分得分 Principal component score		*F*	排名 Ranking	隶属函数值 Subordinate function values		*D*	排名 Ranking
	*F*1	*F*2			$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$		
H1F1	−0.477	−1.273	−0.783	7	0.538	0.059	1.115	7
H1F2	1.070	−1.250	0.057	5	0.719	0.181	1.545	5
H1F3	1.327	−1.620	0.043	6	0.743	0.086	1.542	6
H2F1	−2.130	−0.027	−1.153	8	0.319	0.332	0.825	8
H2F2	1.287	1.233	1.200	1	0.731	0.961	2.001	1
H2F3	1.407	0.610	1.007	2	0.754	0.779	1.947	2
H3F1	−3.217	0.133	−1.667	9	0.263	0.263	0.675	9
H3F2	0.090	1.113	0.507	4	0.682	0.790	1.808	4
H3F3	0.643	1.077	0.790	3	0.695	0.851	1.868	3

3　讨　论

3.1　水肥耦合对娃娃菜田土壤理化性质的影响

土壤 pH 和 EC 值直接影响土壤理化性质,且与水肥投入关系密切[23]。本研究表明,土壤 pH 和 EC 在同一灌水条件下随施肥量的增加均呈上升趋势,这可能是由于在土壤水分不变的情况下,增加施肥量使肥料中的某些离子(如 OH^-、K^+、SO_4^{2-} 等)在土壤中富集,导致土壤 pH 和 EC 值升高;同一施肥水平下,土壤 pH 和 EC 均随灌水量的增加逐渐下降,说明施肥量不变的情况下,增大灌水量可增加土壤中的氢离子浓度,加速土壤中离子的交换、迁移和扩散,使土壤 pH 和 EC 值下降。钟爽等[24]认为土壤 pH 随着施肥量的增加而降低、随着灌水量的增加而增加,这可能是因为肥料在土壤中经过微生物分解和化学反应后,释放出的浓度逐渐升高,导致土壤 pH 值下降;灌水量过高导致土壤中氢氧离子积累,使土壤 pH 值升高。土壤 EC 值可反映土壤混合盐的含量,适量的灌水和施肥配比能抑盐脱盐[25]。潘昭隆等[26]研究发现,土壤电导率随施肥量的升高而升高,减少施肥量能有效缓解土壤盐渍化,这与本研究结果一致。土壤养分是土壤理化性质的重要表征,也是植物生长发育的营养基础,受灌水量影响较大[27]。本研究表明,在娃娃菜生长过程中,水肥对土壤养分含量影响显著。灌水量相同时,土壤有机质、全氮、全磷、全钾及速效养分含量均随施肥量的增大而增大,而在紫甘蓝上的研究表明[15],在灌水下限相同时随施肥量的增加土壤有机质含量呈先升高后下降趋势。施肥量相同时,娃娃菜根区土壤有机质、全氮、全磷、全钾及速效养分含量均随灌水量的增加而降低,这可能是由于高水促进了养分向土壤深层迁移,进而降低了土壤养分累积量。水肥交互作用下,娃娃菜根区土壤有机质、全氮、全磷、全钾及速效养分含量均在低水高肥(H1F3)处理下最大、高水低肥(H3F1)处理下最小。可见,水肥的合理施用能改善娃娃菜田土壤的理化性质,调节土壤酸碱平衡,降低肥料向下淋移的风险。

3.2　水肥耦合对娃娃菜植株养分吸收的影响

植物生长发育需要水分和养分来支撑,水分作为养分的载体,对养分的吸收具有至关重要的作用[28]。研究发现,同一施肥水平下增加灌水量可显著提高作物对养分的吸收积累[29]。本试验在低肥处理水平下增加灌水量可显著提高娃娃菜对磷和钾的吸收,中肥处理水平下娃娃菜叶球中的氮、磷、钾含量及其吸收量随灌水量的增加呈先升高后降低趋势,高肥处理水平下增加灌水量可促进娃娃菜对氮磷钾的吸收。大量研究表明[30-32],植株对氮磷钾的吸收随着灌水量和施肥量的增加而增加,这与本研究高水处理试验结果相似;而在低水和中水处理水平下娃娃菜叶球氮、磷、钾吸收量均随施肥量的增加呈先升高后降低趋势,可能是因为施肥量过大,在一定程度上降低了娃娃菜根际土壤溶质势,造成水势降低,水分和养分运输受阻,进而影响叶球对养分的吸收,这与在黄瓜[33]上的研究结果一致。植物养分吸收受灌水和施肥的影响,土壤水分不足或湿涝、施肥量过多或过少均会影响蔬菜对养分的吸收,适宜的水肥组合能促进甘蓝[34]、辣椒植株对氮磷钾养分的吸收[35]。本研究表明,娃娃菜叶球全氮、全磷和全钾含量及氮磷钾吸收量均在中水中肥(H2F2)处理水平下显著升高,说明适宜的水肥组合可有效促进娃娃菜对氮磷钾的吸收。

3.3　水肥耦合效应综合评价

前人采用主成分分析法对番茄氮、磷、钾利用效率等指标进行综合评价,提出了番茄优质高效高产的水肥管理措施[36];陈潇洁等[20]通过主成分分析法和隶属函数法综合评价番茄的各项指标,筛选出适宜的水肥耦合模式。本研究表明,低水和中水条件下综合得分随施肥量的增加呈先升高后降低趋势,高水条件下综合得分随施肥量的增加而升高;F1 水平下 H3 处理得分最高,而 F2 和 F3 水平下 H2 处理综合得分最高。从由各主成分的方差百分比和主成分得分计算的不同水肥处理综合得分值(F)及由各主成分平均隶属函数值和权重计算的各处理综合评价得分值(D)来看,H2F2 处理 F 值和 D 值均最大,说明中水中肥(H2F2)处理为本试验条件下最优的水肥耦合模式。这与本课题组在水肥耦合对春茬和秋茬娃娃菜产量和品质影响的研究中得到的结果一致[1,37]。

4　结　论

从不同灌水量和施肥量组合处理露地娃娃菜发现,水肥耦合模式下,中水中肥(H2F2)处理可在一定程度上改善娃娃菜田土壤的理化性质,维持土壤酸碱平衡,提高叶球养分含量,增加养分累积量。基于主成分分析和隶属函数分析,综合考虑娃娃菜田土壤理化性质和叶球氮、磷、钾吸收量,认为灌水下限控制在田间持水量的 70%、灌水上限为田间持水量、施肥量 N 330-P_2O_5 195-K_2O 450 kg·hm^{-2}(即整地时施 N 66.0-P_2O_5 50.8-K_2O 67.5 kg·

hm^{-2},缓苗结束后随水追施 N 26.4-P_2O_5 9.4-K_2O 38.3 kg·hm^{-2},莲座期、结球初期和叶球膨大期各追施 N 79.2-P_2O_5 28.3-K_2O 114.8 kg·hm^{-2})的组合在节水减肥的基础上能最大程度地维持土壤理化性质,提高叶球对养分的吸收利用,是甘肃河西走廊冷凉灌区露地秋茬娃娃菜较优的水肥管理模式。由于本研究只进行了一年,娃娃菜的水肥适应性体现不连续,因此应进行长期连续试验,进一步为河西冷凉灌区露地秋茬娃娃菜水肥管理提供更全面的理论依据。

参 考 文 献:

[1] 马彦霞, 陈静茹, 王晓巍, 等. 水肥耦合对娃娃菜产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 40-45.
MA Y X, CHEN J R, WANG X W, et al. The combined effect of water and fertilizer on yield and quality of mini Chinese cabbage in cold-cool irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 40-45.

[2] MA S M, TONG L, KANG S Z, et al. Optimal coupling combinations between dripper discharge and irrigation interval of maize for seed production under plastic film-mulched drip irrigation in an arid region[J]. Irrigation Science, 2022, 40(2): 177-189.

[3] 温越, 王振华, 李文昊, 等. 极端干旱区水肥耦合对滴灌葡萄产量和品质的影响研究[J]. 核农学报, 2021, 35(10): 2431-2439.
WEN Y, WANG Z H, LI W H, et al. Research on the effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of drip irrigation grapes in extremely arid regions[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(10): 2431-2439.

[4] 侯云鹏, 孔丽丽, 尹彩侠, 等. 覆膜滴灌下氮肥与种植密度互作对东北春玉米产量、群体养分吸收与转运的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(1): 54-65.
HOU Y P, KONG L L, YIN C X, et al. Interaction between nitrogen fertilizer and plant density on nutrient absorption, translocation and yield of spring maize under drip irrigation in Northeast China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2021, 27(1): 54-65.

[5] 杜甫, 童旭华, 姬小明, 等. 水肥耦合对植烟土壤理化性质和烤烟产质量的影响[J]. 江西农业学报, 2021, 33(3): 67-74.
DU F, TONG X H, JI X M, et al. Effects of water and fertilizer coupling on physical and chemical properties of tobacco-growing soil and yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(3): 67-74.

[6] 李慧, 王旭敏, 刘朋召, 等. 耦合效应弥补水氮减量对夏玉米养分吸收和利用的不利影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1283-1296.
LI H, WANG X M, LIU P Z, et al. Interaction offset the adverse impacts of water and nitrogen reduction on nutrient accumulation and utilization of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2022, 28(7): 1283-1296.

[7] GU L M, LIU T N, ZHAO J, et al. Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(2): 374-388.

[8] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 滴灌施肥条件下砂田设施甜瓜的水肥耦合效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2164-2173.
MA Z M, DU S P, XUE L. Coupling effects of water and fertilizer on melon in plastic greenhouse of gravel-mulched field under drip fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2164-2173.

[9] WANG D, LI G Y, MO Y, et al. Evaluation of optimal nitrogen rate for corn production under mulched drip fertigation and economic benefits[J]. Field Crops Research, 2018, 216: 225-233.

[10] ZHOU X, WANG R S, GAO F, et al. Apple and maize physiological characteristics and water-use efficiency in an alley cropping system under water and fertilizer coupling in Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 1-12.

[11] WANG X K, GUO T, WANG Y, et al. Exploring the optimization of water and fertilizer management practices for potato production in the sandy loam soils of Northwest China based on PCA[J]. Agricultural Water Management, 2020, 237: 106180.

[12] 周亚婷, 张国斌, 王丽君, 等. 不同水肥供应对结球甘蓝干物质积累、养分吸收及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(3): 73-79.
ZHOU Y T, ZHANG G B, WANG L J, et al. Effect of different water and fertilizer supply on dry matter accumulation, nutrient uptake and yield of cabbage[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2015, 50(3): 73-79.

[13] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 70-80.
XING Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 70-80.

[14] 秦启杰, 吕剑, 冯致, 等. 高原夏季露地紫甘蓝产量、品质及养分吸收对不同水肥组合的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(5): 56-65, 72.
QIN Q J, LV J, FENG Z, et al. Responses of yield, quality and nutrient absorption of purple cabbage to different irrigation and fertilization combinations[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(5): 56-65, 72.

[15] 缑兆辉, 秦启杰, 吕剑, 等. 不同水肥组合对高原夏季露地紫甘蓝产量和土壤理化性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 137-144.
GOU Z H, QIN Q J, LV J, et al. Effects of different water and fertilizer combinations on yield of purple cabbage and soil physical and chemical properties on plateau in summer[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 137-144.

[16] 毕丽霏. 灌水下限和施肥量对榆林沙地马铃薯生长和水肥利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
BI L F. Effect of irrigation threshold and fertilization on the growth, water and fertilizer use efficiency of potato in Yulin sandy land[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[17] 刘祖汀, 王丽萍, 屈忠义, 等. 引黄春灌对盐碱土区地下水动态及理化性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 101-108.
LIU Z T, WANG L P, QU Z Y, et al. The changes in depth and physicochemical properties of groundwater in response to spring irrigation in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 101-108.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[19] 王利立, 朱永永, 赵彦华, 等. 施氮和根间互作对密植大麦间作豌豆氮素利用的协同效应[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2):

200-210.
WANG L L, ZHU Y Y, ZHAO Y H, et al. Response of nitrogen utilization to root interaction and plant density in barley-pea intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 200-210.

[20] 陈潇洁, 吕德生, 王振华, 等. 加气灌溉及水氮耦合滴灌对加工番茄产量及品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(11): 191-200.
CHEN X J, LV D S, WANG Z H, et al. Effects of water and nitrogen coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated irrigation[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(11): 191-200.

[21] 肖继兵, 刘志, 辛宗绪, 等. 基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 34-44.
XIAO J B, LIU Z, XIN Z X, et al. Identification of drought tolerance in foxtail millet during its entire growth period based on principal component analysis and membership function[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 34-44.

[22] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 基于温室番茄产量和果实品质对加气灌溉处理的综合评价[J]. 中国农业科学, 2020, 53(11): 2241-2252.
ZHU Y, CAI H J, SONG L B, et al. Comprehensive evaluation of different oxygation treatments based on fruit yield and quality of greenhouse tomato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(11): 2241-2252.

[23] 马彦霞, 王晓巍, 张玉鑫, 等. 河西绿洲区菜田掺沙对土壤理化性状和甘蓝生长的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(11): 2265-2272.
MA Y X, WANG X W, ZHANG Y X, et al. Effects of addition of sand on the physical and chemical properties of the Hexi corridor soil and growth and yield of cabbage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(11): 2265-2272.

[24] 钟爽, 曾会才, 金志强. 不同水肥耦合对香蕉产量及土壤化学性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(增刊 1): 26-28.
ZHONG S, ZENG H C, JIN Z Q. Effect of different water and fertilizer coupling on yield of banana and soil chemical property[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S1): 26-28.

[25] 朱珠, 李发永. 水肥耦合作用对滴灌枣园土壤盐分的影响[J]. 节水灌溉, 2018, (6): 52-57.
ZHU Z, LI F Y. Effects of water and fertilizer coupling on soil salinity in jujube field under drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2018, (6): 52-57.

[26] 潘昭隆, 刘会芳, 赵帅翔, 等. 氮肥投入对不同土壤类型电导率变化的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(4): 533-537.
PAN Z L, LIU H F, ZHAO S X, et al. The influence of nitrogen fertilizer input on electrical conductivity of different soil types[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition), 2021, 50(4): 533-537.

[27] 施志国, 王振龙, 宿翠翠, 等. 不同灌水量和栽培方式对土壤养分及菊芋产量和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 133-141.
SHI Z G, WANG Z L, SU C C, et al. Effects of different irrigation amounts and cultivation methods on soil nutrients, yield and quality of Jerusalem artichoke[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 133-141.

[28] 马建琴, 何沁雪, 刘蕾. 双目标条件下玉米水肥耦合效应分析及配施方案优化研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 58-63.
MA J Q, HE Q X, LIU L. Optimizing irrigation and fertilization coupling to balance the improvement of yield and water use efficiency of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 58-63.

[29] 金辉, 侯东颖, 张曼, 等. 水肥耦合对大棚西瓜产量、品质及养分吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (2): 141-148.
JIN H, HOU D Y, ZHANG M, et al. Effects of water and fertilizer combinations on yield, quality and nutrient absorption of watermelon in greenhouse[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2021, (2): 141-148.

[30] 高娜, 张玉龙, 刘玉, 等. 水氮调控对小油菜养分吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 821-828.
GAO N, ZHANG Y L, LIU Y, et al. Regulation effects of irrigation and nitrogen fertilization on nutrient absorption, water/nitrogen use efficiency and yield of rape[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 821-828.

[31] CAI S M, LI W G, LI J Y, et al. Nutrient absorption and dry matter accumulation of greenhouse vegetable under optimizer coupling of water and fertilizer[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(3): 385-389.

[32] WANG H D, WU L F, WANG X K, et al. Optimization of water and fertilizer management improves yield, water, nitrogen, phosphorus and potassium uptake and use efficiency of cotton under drip fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106662.

[33] 马新超, 周宇, 刘青, 等. 水肥耦合对黄沙炉渣复合基质栽培黄瓜光合荧光特性、产量及品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(3): 597-608.
MA X C, ZHOU Y, LIU Q, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic fluorescence characteristics, yield and quality of cucumber cultivated with yellow sand and slag composite substrate[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(3): 597-608.

[34] 马彦霞, 张玉鑫, 王晓巍. 河西绿洲区大棚甘蓝产量、品质和养分吸收对不同水肥组合的响应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 270-276.
MA Y X, ZHANG Y X, WANG X W. Response of yield, quality and nutrients absorption of greenhouse cabbage to different combinations of water and fertilizer in Hexi oasis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 270-276.

[35] 高文瑞, 王欣, 李德翠, 等. 不同水肥组合对辣椒植株生长及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(9): 49-56.
GAO W R, WANG X, LI D C, et al. Different combinations of fertilizer and water: effects on plant growth and nutrient absorption of pepper[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(9): 49-56.

[36] 李康. 温室番茄水肥优质高效利用模式研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
LI K. Mode of high quality and efficient use with water and fertilizers in greenhouse tomato[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.

[37] 陈静茹, 王晓巍, 马彦霞, 等. 河西冷凉灌区膜下滴灌娃娃菜产量和品质对水肥耦合的响应[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (6): 159-166.
CHEN J R, WANG X W, MA Y X, et al. Response of mini Chinese cabbage yield and quality to coupling of water and fertilizer by drip irrigation under mulch in Hexi cold irrigation area[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023, (6): 159-166.