

设施葡萄智能化水肥管理体系研究

李增源¹, 王绍雷², 姬廷廷¹, 张卫峰^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院 / 中国农业大学农业绿色发展研究院 / 中国农业大学农业绿色发展学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学曲周实验站, 河北 曲周 057250)

摘 要: 当前设施葡萄栽培中水肥盲目投入问题严重, 因为缺乏灌溉决策标准导致农户实际生产中难以合理应用水肥一体化技术。利用基于 NB-IoT 网络传输的固态电阻传感器设备对设施葡萄根系土壤水分进行实时监测, 建立了基于土壤水分张力的设施葡萄灌溉决策指标, 并依托水肥一体化设备实现自动灌溉。研究结果表明: 智能灌溉与施肥结合的综合管理比农户常规管理单穗重提高 161 g, 产量提高 20.2 t/hm², 可溶性固形物含量提高 31.1%, 含酸量降低 21.9%, 维生素 C 含量增加 4.13 mg/100 g, 用水量下降至 2016 t/hm², 相比于农户滴灌方式节水效率达到 33.3%, 灌溉和施肥总成本节省 32.2%。以萌芽至开花前土壤水分压力低于 30 kPa, 果实生长期低于 200 kPa 设置灌溉决策指标基本可以实现设施水量平衡, 根据土壤养分供应和作物目标产量养分吸收量设置肥料投入定额, 可以用于设施葡萄水肥一体化体系智能管理。

关键词: 智能化; 水肥管理; 传感器; 灌溉决策

中国设施葡萄产业发展迅速, 截至 2016 年我国设施葡萄种植面积已达 23.07 万 hm², 占葡萄总面积的 26.6%, 居全球第一^[1]。但我国的设施栽培基本沿用露地栽培技术, 投入甚至更高, 尤其是尚未构建环境调控与水肥调控一体化技术, 盲目增加水肥投入反而加剧了枝条营养过旺、设施湿度增加等风险, 导致产量不稳定、品质不能保证, 生产水平远低于发达国家^[2]。水肥一体化技术可以控制水分和养分投入, 已成为发达国家设施葡萄生产中主流技术^[3]。国内已有研究采用灌溉定额决策方法的水肥一体化技术节水率可达 50%^[4], 水分利用率和肥料利用率均可提高 40% 左右^[5-6], 并能调节果树生长量^[7], 提高产量和品质^[4, 8]。但这些技术依赖专业的技术指导, 农户实际应用较为困难。再加上我国设施管理水平相对较低, 传感器装备基础水平差, 难以和传感器等物联网技术进行融合, 导致我国设施葡萄中水肥一体化技术发展缓慢。

目前一些灌溉决策指标的研究集中在适宜灌溉阈值对生长、产量和品质的影响方面^[9-11], 虽然不同研究中的灌溉决策有着一定的参考作用, 但不同品

种和地区的灌溉阈值不尽相同, 大多数灌溉决策的建立依赖于特定土壤的田间持水量, 对其他地区和土壤环境下的葡萄种植难以提供可靠有效的参考。因此, 选择不受土壤类型和特定位置影响的土壤水分传感器^[12]来反映葡萄生长过程的水分亏缺情况并及时进行灌溉决策, 配合目标产量法进行水肥一体化应用, 是具有实际应用前景的技术途径。目前基于土壤水分张力原理的决策指标在葡萄上仅有少量研究于盆栽条件下开展。原因是传统土壤水分张力计在实际生产中只能测定 80 ~ 85 kPa 的土壤水吸力, 无法满足灌溉需求, 且测定费时费力, 时效性差, 难以及时指导灌溉。

随着传感器技术和物联网技术的发展, 智能化决策葡萄水肥需求来实现水肥的精准施用成为发展趋势。美国、以色列等发达国家已经对智能化灌溉施肥综合系统进行了研究并取得一些成果^[13]。发展较快且具有代表性的是固态电阻传感设备, 利用土壤水分张力和电阻之间的相关关系测量土壤水分张力, 具体方法是将一对高度耐腐蚀的电极嵌入颗粒状基质中模拟根系吸收水分所需要的能量, 即土壤水分张力, 单位用 kPa 表示。于 1978 年开始投入生产, 帮助种植户提高灌溉效率, 近些年配合物联网系统已经成为科学调控灌溉管理制度的成熟工具, 被广泛应用于生产研究^[12, 14-16]。我国智能化传感器研发近两年发展迅速, 但在实际生产中的

收稿日期: 2020-08-27; 录用日期: 2020-10-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0201303)。

作者简介: 李增源 (1993-), 博士研究生, 研究方向为植物营养。

E-mail: 514851596@qq.com。

通讯作者: 张卫峰, E-mail: wfzhang@cau.edu.cn。

应用不多,除却基础设施不完善之外,传感器等先进决策工具和农学技术还未实现匹配是主要的问题^[17]。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018年9月到2019年9月在河北省邯郸市曲周县曲周镇胡近口村德众普萄生态科普园(36° 48' 22.7" N, 114° 59' 35.3" E)的温室大棚中进行。供试土壤有机质为12.3 g/kg,全氮为1.43 g/kg,有效磷为86.1 mg/kg,速效钾为614 mg/kg, pH为8.2。供试葡萄品种为弗雷无核(也称火焰无核),欧美种,种植年限为5年,架型为双十字“V”形架,行距2 m,株距0.7 m。于棚内每一行葡萄垄上铺设国产1寸PE材质滴灌带,主进水管安装国内科芯公司产的NB-IoT智能电磁阀和智能水表进行灌水开关控制和水量监测,在简易的塑料施肥桶内加装一个12 V的小型电泵来抽取肥液,并添加开关采用注入式施肥方式控制施肥。

1.2 试验设计

选择面积为2988 m² (166 m×18 m)的一个塑料大棚进行试验,采用“十”字法将大棚分为4块,分别对应农户传统水肥处理(FT)、灌溉施肥综合管理(IM)、优化灌溉处理(OI)、优化施肥处理(OF)4个处理,每个处理3个重复。

FT处理:采用水肥一体化方式进行施肥和浇水,但施肥量、施肥时间、灌溉量和灌溉时间遵循农户传统。各时期灌水量见表1,各时期土壤水分压力情况见图1,各时期施肥量见表2,基肥用复合肥(15-9-16)、硫酸镁、中微量元素肥;膨果肥用复合肥(15-9-16)。

OI处理:根据安装在棚内的土壤水分压力传感器数值反映的土壤干燥情况在整个葡萄生长期进行灌溉。土壤水分压力值对应的土壤干燥程度分级标准^[18]为:0~10 kPa:饱和土壤;10~30 kPa:土壤足够湿润(正在湿润);30~60 kPa:灌溉通常范围;60~200 kPa:土壤变得干旱和危险。参照这一阈值,本试验设置的灌溉决策阈值为开花前保持土壤水分压力值低于30 kPa,是因为升温闷棚至新梢生长期需要足够的水分促使葡萄萌发和新梢抽出。而开花期不浇水则必须在开花前进行足够的水分补充,开花期后根据土壤情况减少灌溉次数,但保持土壤水分压力值小于200 kPa,这是因为后期

水分应该保持适量而不能过多,防止掉粒、裂果和成熟时间推迟。各时期土壤水分张力情况见图1,各时期灌溉次数及灌溉量见表1。施肥量和施肥时期与FT处理保持一致(表2)。

表1 优化灌水和农户常规各时期的灌溉次数及灌溉量

处理	升温期	萌芽前	萌芽期	开花前	膨大期	着色期	总计
FT	灌溉次数	1	0	1	1	1	5
	灌溉量	940.5	0.0	223.5	153.0	1399.5	3074.0
		(t/hm ²)					
OI	灌溉次数	1	1	2	3	2	10
	灌溉量	606.0	120.0	57.0	87.0	613.5	2093.5
		(t/hm ²)					

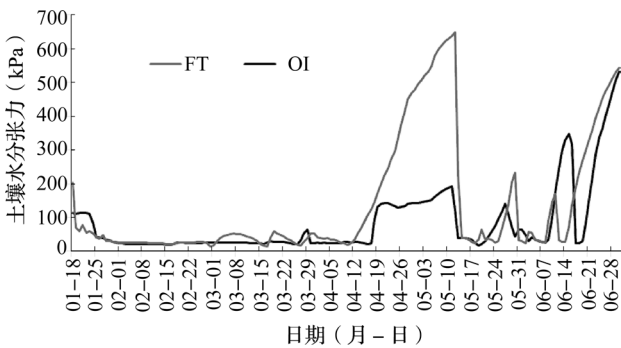


图1 农户常规和优化灌水对土壤水分张力的影响

表2 试验施肥处理 (kg/hm²)

处理	养分	基肥	开花前	膨大期	着色期	总和
FT	N	62.50	0.00	61.30	0.00	123.80
	P ₂ O ₅	33.75	0.00	111.75	78.00	223.50
	K ₂ O	60.00	0.00	111.00	58.50	229.50
OF	N	112.50	33.75	56.25	22.50	225.00
	P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	K ₂ O	51.50	0.00	25.75	25.75	103.00

OF处理:选择面积为747 m² (83 m×9 m)的地块作为小区,按照河北省丰产园的标准选择30.0 t/hm²产量目标,利用目标产量法^[19]进行肥料用量计算。其中氮素投入总量控制在225 kg/hm²,比农户传统投入量增长81.7%,主要是因为该园区连续多年重视磷、钾肥,轻视氮肥导致土壤氮含量不足而磷、钾含量过量,由于土壤中磷含量过高,优化处理中完全不用磷肥。计算结果及养分投入量见表2。为了配合水肥一体化操作,肥料类型为基肥

用尿素、硫酸钾；开花前尿素；膨大期尿素、硫酸钾；着色期尿素、硫酸钾。提前配置好各施肥期的肥料溶于施肥桶中，施肥时先用手机端软件打开灌水管电磁阀通水，后通过手机端软件打开开关控制简易施肥桶中的电泵工作进行注入式施肥。灌水量和灌水时间与 FT 处理保持一致（表 1）。

IM 处理：选择面积为 747 m^2 ($83 \text{ m} \times 9 \text{ m}$) 的地块作为试验小区。灌溉定额与 OI 处理灌溉量相同（表 1），施肥方案与 OF 处理相同（表 2）。

4 个处理中其他操作和管理均相同，均在基肥投入相同量腐熟鸡粪和羊粪，开花前喷施等量锌肥，开花后喷施等量硼肥，膨大期交替喷施等量的磷酸二氢钾和糖醇钙肥。

1.3 传感器布置及监测

施肥灌溉的位点与作物根系分布和栽培管理模式密切相关，研究表明，地上灌溉方式传感器应布置在根系吸收水分的临界区域^[20]，也可将 2 个水分探头安装在根系分布的上下临界层，且深处水分传感器的埋设深度应是浅处的 2 倍^[21]。史岩等^[22]研究发现土壤水分探头的适宜埋设深度为地表下 10、30、60 和 100 cm；杨绍辉等^[23]通过分析土壤含水率垂向变化规律发现土壤水分传感器安装在地表下 10、20 和 50 cm 即可监测 0 ~ 100 cm 土层的水分情况。综合来看，葡萄的土壤水分监测需将传感器安置在根系的集中区域，必须先测定葡萄根系的深度和范围，根据根系分布范围确定传感器布置的深度和位置。

2018 年 9 月选择壕沟剖面法对试验棚进行根系调查，因株距较小，选择主干间进行剖面挖掘较为困难，因此选择在主干两侧行间位置进行双剖面的挖掘，观察根系分布情况。整个大棚选择以对角线为基准，在对角线范围选择两端和中间 3 个位置附近随机选择两株葡萄，共计对 6 株葡萄树进行剖面挖掘和观察。壕沟共深 70 cm，取距离主根水平方向每 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的土块装袋，用清水洗根，并用根系扫描仪进行根系扫描并记录结果。结果显示试验棚内葡萄根系分布范围为水平方向 0 ~ 70 cm，垂直方向 0 ~ 50 cm。根系整体分布在距离主根水平 0 ~ 40 cm，垂直距离 0 ~ 30 cm 区域内。而总根长在距离主根水平 0 ~ 10 cm，垂直 10 ~ 20 cm 区域分布最密集，达到 3161 cm；而吸收根（径级 0 ~ 2 mm）在距离主根水平 0 ~ 10 cm，垂直 10 ~ 20 cm 处分布最密集，达到 1132 cm，因此将土壤水分传感器布置在垂直 20 cm 处最合适，考虑机械操作便利性，选择垄上距离葡萄主干向西 5 cm 处最为合适。

在各试验小区中间一行葡萄架位置上安装西班牙产的 eVineyard 一体式传感器各两个，均匀分布于同一行上，土壤水分传感器探头安装在距离主干向西 5 cm、垂直 20 cm 深的位置。自动监测记录土壤水分压力情况，根据两台传感器的压力平均值进行灌溉操作判定，当压力值超过阈值时通过软件打开电磁阀及时灌溉，流程见图 2。

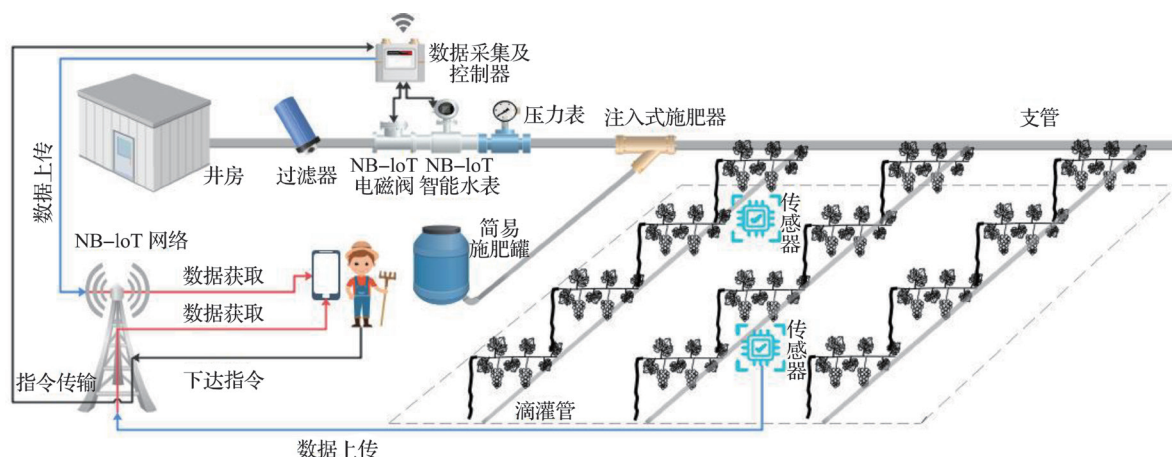


图 2 传感器监测及自动灌溉控制示意图

1.4 测定指标

新梢长度：新梢长度是葡萄生长的关键指标，也影响葡萄养分累积和转移过程。新梢摘心前用卷尺测量各处理随机选取的 15 条结果枝基部到顶端

的长度，取其平均值，单位为 cm。测样时期为萌芽后至摘心操作前，测样时间间隔为 3 d 左右，日期为 3 月 9 日、3 月 12 日、3 月 15 日、3 月 19 日、3 月 21 日、3 月 24 日、3 月 27 日和 3 月 31 日。

新梢茎粗: 新梢摘心前和成熟期, 每个处理随机调查 15 条结果枝, 用游标卡尺测量结果枝第 3 节间的平凹面粗度, 单位为 mm。测样时期为整个生长期, 测样时间间隔为 1 个月, 日期为 3 月 20 日、4 月 20 日、5 月 20 日、6 月 20 日。

新梢叶片 SPAD: 新梢摘心前和成熟期, 每个处理随机调查 15 条结果枝, 用 SPAD 仪测量结果枝第 4 叶片的 SPAD 值, 精确到 0.1。测样时期为整个生长期, 测样间隔为 20 d, 日期为 4 月 5 日、4 月 25 日、5 月 15 日、6 月 5 日和 6 月 25 日。

产量和单穗重: 葡萄收获期测定, 每个处理随机选取 15 株正常结果树, 记录每株葡萄果穗数, 并随机选取 10 穗葡萄测定单穗重, 取平均值, 计算单株产量, 折算成每公顷产量 = 单株产量 × 公顷株数, 单位为 t/hm²。

果实横径: 将测产中随机选取的 10 穗葡萄作为样品, 然后分别从果穗上、中、下取 3 粒果实, 共 30 粒, 用游标卡尺测定果实横径, 单位为 mm; 电子天平称单粒重, 单位为 g。

内在品质: 葡萄成熟期采样测定, 可溶性固形物用糖度计测定, 单位为 %; 可滴定酸通过 NaOH 中和滴定法测定, 单位为 %; 维生素 C 含量采用 2, 6- 二氯酚酚滴定法测定, 单位为 mg/100 g。

水分利用效率 (WUE) 采用灌溉水利用效率即葡萄的产量与灌水量之比来表示。

氮肥偏生产力 (PFPN) 采用葡萄鲜果产量与氮肥投入量之比表示。

2 结果与分析

2.1 对设施葡萄生长指标的影响

2.1.1 新梢长度

4 个处理中, FT 处理 3 月 9 日新梢长度最短, 但水肥的过量供应导致生长速率较快, 后期与 OF 和 IM 处理无显著性差异, 但显著高于 OI 处理。反映出水肥对新梢生长的调节作用, 通过降低灌水量能够显著避免新梢徒长, 而肥料的投入特别是氮肥用量的提高对新梢长度有明显的促进作用。

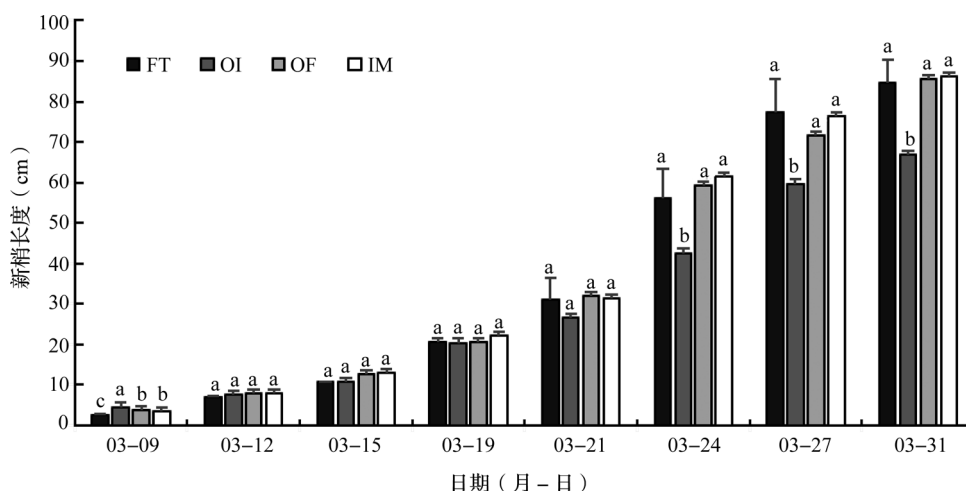


图 3 不同处理对新梢长度的影响

注: 小写字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 新梢茎粗

通过对新梢茎粗的分析 (图 4) 发现, 新梢茎粗在 3、4 和 6 月各处理间均没有显著差异, 仅 5 月有一定差异, 其中 OF 和 IM 处理显著高于 FT 处理, 而与 OI 处理无差异。说明灌水量减少并不会影响新梢茎粗, 再配套合理施肥反而有利于葡萄新梢茎粗的增加。

2.1.3 SPAD 值

图 5 显示, 各处理在生长后期叶片 SPAD 值趋于一致, 但前期 SPAD 值表现出差异。OF 处理通过增加前期氮肥投入, 叶片 SPAD 值显著高于 FT 处理, 反映出随着氮肥投入的增加, 光合作用和营养转化能力加强。OI 处理降低灌水量并没有显著改变叶片 SPAD 值, 而 IM 处理在生长期

SPAD 值显著高于 FT 处理。这反映出氮肥是决定叶片 SPAD 值的主要因素,而适当降低灌溉量不会降低叶片 SPAD 值。

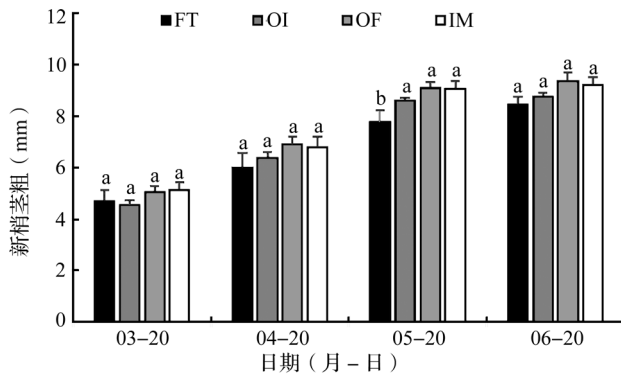


图 4 不同处理对新梢茎粗的影响

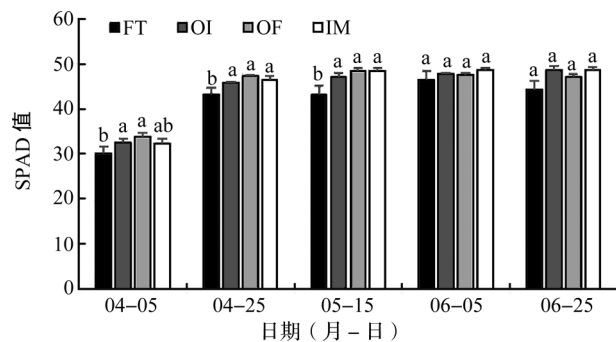


图 5 不同处理对叶片 SPAD 值的影响

2.1.4 果实横径

图 6 显示,5 月初果期果实横径处理间没有差异,从 6 月开始随着果实生长各个处理间差异显现,其中 OI、OF 和 IM 处理均能够显著提高果实横径,不同处理对果实横径促进作用的时间先后顺序为 OF 处理最早,其次为 IM 处理,最后为 OI 处理,这表明肥料的合理施用是决定果实横径快速增长的主要因素,水分的合理供应也能够显著增加果实横径,但效果弱于合理施肥。

2.2 对设施葡萄产量与品质指标的影响

2.2.1 单穗重、单株穗数、单粒重和产量

通过对产量指标进行分析(表 3)看到, OI、OF 和 IM 处理能够显著提高单穗重和单粒重,但对于单株穗数和产量而言, OI 和 OF 处理并没有显著提升穗数和产量,而水肥交互作用的 IM 处理能够显著提升穗数和产量。

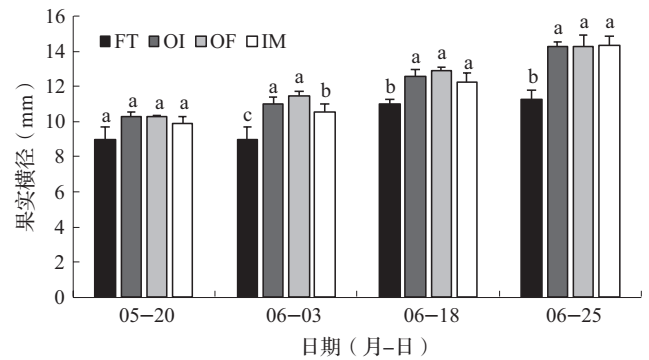


图 6 不同处理对果实横径的影响

表 3 不同处理下的单穗重、单株穗数、单粒重和产量

处理	单穗重 (g)	单株穗数	单粒重 (g)	产量 (t/hm ²)
FT	204 ± 15c	11.0 ± 0.8b	1.82 ± 0.07b	16.7 ± 0.3b
OI	274 ± 15b	12.0 ± 0.6ab	2.42 ± 0.15a	23.6 ± 2.8b
OF	344 ± 18a	12.0 ± 1.0b	2.65 ± 0.06a	27.3 ± 4.9ab
IM	365 ± 17a	15.0 ± 1.2a	2.54 ± 0.11a	37.0 ± 3.4a

注:同列小写字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2.2 可溶性固形物、可滴定酸、固酸比和维生素 C 含量

通过对果实品质进行测定(表 4)分析发现, OF 和 IM 处理的果实可溶性固形物含量显著提高,而 OI 与 FT 处理相比可溶性固形物无显著性差异,这反映出可溶性固形物的改善主要通过合理施肥实现。OI、OF 和 IM 处理均能显著降低可滴定酸含量,提升固酸比,而维生素 C 含量需要合理的水肥交互 (IM) 才能够实现显著提高。

表 4 不同处理下的果实品质指标

处理	可溶性固形物 (%)	可滴定酸 (%)	固酸比	维生素 C 含量 (mg/100 g)
FT	15.1 ± 0.6b	0.73 ± 0.10a	21.4 ± 2.9b	0.63 ± 0.13b
OI	17.8 ± 0.3ab	0.55 ± 0.01b	32.5 ± 0.8a	1.23 ± 0.26b
OF	19.6 ± 0.4a	0.51 ± 0.02b	38.7 ± 2.6a	2.35 ± 0.76b
IM	19.8 ± 1.2a	0.57 ± 0.01b	35.1 ± 2.5a	4.80 ± 0.97a

2.3 对水分、养分利用效率及经济效益的影响

2.3.1 水分利用效率

试验所在的德众葡萄园在 2019 年以前均采用漫灌方式进行灌溉,整个物候期一共灌水 5 次,总灌水量 4500 t/hm²,2019 年更改为滴灌方式 (FT) 后灌溉量仍为 5 次,而用水量下降至 3024 t/hm²,

OI 处理用水量下降至 2016 t/hm², 相比于 FT 处理节水效率达到 33.3%。IM 处理的 WUE 最高, 其次为 OI 和 OF 处理, FT 处理最低, 仅为 5.53 kg/m³, 这表明农户采用水肥一体化后因缺乏灌溉决策仅将其作为一种输水方式来进行灌溉, 并没有提高水分利用效率。

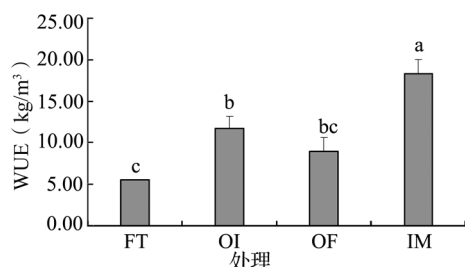


图 7 不同处理对水分利用效率的影响

2.3.2 氮肥偏生产力

PFPN 反映了氮肥的效率, 图 8 表明, OI 处理 PFPN 最大, 显著高于 OF 处理。FT、OF 和 IM 处理的 PFPN 差异不显著, 原因主要是 OF 和 IM 处理提高了氮肥的用量。在相同施肥条件下, OI 处理通过合理灌溉促进了氮肥的利用, 比 FT 处理提高 41.3%。在相同灌溉条件下增加氮肥投入, OF 和 FT 处理的 PFPN 差异不显著, IM 和 OI 处理的 PFPN 差异不显著, 这表明合理增加氮肥并不会降低氮肥的利用效率。

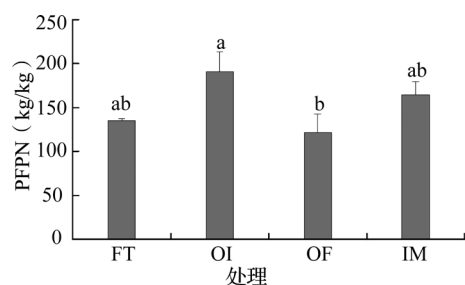


图 8 不同处理对氮肥偏生产力的影响

2.3.3 经济效益

通过对灌溉成本进行分析发现, 园区采用深井水进行灌溉, 水泵功率为 30.0 kW, 额定流量为 50.0 t/h, 计算灌溉 1 t 水的耗电量为 0.6 kW/h。根据农业用电 1 kW/h 0.61 元计算用电成本, 漫灌共花费 1665 元/hm²; 滴灌 (FT) 方式用电成本为 1119 元/hm² (表 5); 优化灌水处理 (OI) 用电成本为 746 元/hm²。表 5 表明, 按照农业用水价格每吨 0.40 元计算水费, FT、OI 处理水费成本分别为 1210、806 元/t。滴灌带按照 0.06 元/m 计算, 滴

灌带成本为 291.6 元/hm²。传感器成本按照 8 年使用年限结合德众葡萄园 33 hm² 的种植面积折算, 成本为每年 77.4 元/hm²。综合计算灌溉成本, FT、OF 处理成本是 2620.6 元/hm²; OI 和 IM 处理成本为 1921 元/hm²。

通过对肥料投入成本进行计算, FT 处理和 OI 处理采用 15-9-16 的复合肥折合 3.13 元/kg 计算, 每公顷投入 2348 元; 硫酸镁折合 2 元/kg 计算, 每公顷投入 150 元; 中微肥折合 3 元/kg 计算, 每公顷投入 900 元, 总计肥料投入成本为每公顷 3398 元。OF 和 IM 处理采用尿素按 2 元/kg 计算, 每公顷投入 978 元; 硫酸镁折合 2 元/kg 计算, 每公顷投入 150 元; 硫酸钾按 5 元/kg 计算, 每公顷投入 1030 元, 总计肥料投入成本为每公顷 2158 元。

总成本为 FT 处理每公顷 6018.6 元; OI 处理比 FT 处理节省成本 11.6%, 每公顷 5319 元; OF 处理比 FT 处理节省 20.6% 的成本, 为每公顷 4778.6 元; IM 处理节省 32.2% 的成本, 为每公顷 4079 元。

表 5 不同处理下的灌溉成本 (元/hm²)

处理	电费	水费	设备成本	人工成本	肥料成本	合计
FT	1119	1210	291.6	0	3398	6018.6
OI	746	806	369.0	0	3398	5319.0
OF	1119	1210	291.6	0	2158	4778.6
IM	746	806	369.0	0	2158	4079.0

注: 各肥料价格分别为: 复合肥 (15-9-16) 125 元/袋, 40 kg; 硫酸镁 2 元/kg; 中微肥 60 元/袋, 20 kg; 尿素 80 元/袋, 40 kg; 硫酸钾 250 元/袋, 25 kg。

3 讨论与结论

灌溉管理常常根据土壤水分含量、植物水分状态以及冠层温度 3 种方式进行灌溉决策^[24], 已有研究中土壤灌溉阈值作为灌溉决策的指标主要分为土壤水分含量、田间持水量和土壤水势 3 种。土壤水分含量指标研究中, 黄冠华等^[9]认为光合速率最高时的土壤水分含量作为灌溉阈值下限合适; Abrisqueta 等^[25]认为作物根区土壤水分含量减少速率从缓慢变为迅速的拐点作为灌溉阈值比较合适。田间持水量指标研究中刘洪光等^[11]基于产量反应得到灌溉阈值为田间持水量的 40%; Zsofi 等^[26]则认为田间持水量的 50% 作为灌溉阈值 WUE 最高。这两种指标基于田间持水量和相对水分含量的决策阈值由于受不同的土壤类型影响较大难以有效

推广应用。土壤水势由于能够反应根系从土壤中获取水分的能力,是较好的决策指标,以往研究中梁鹏^[10]的研究表明土壤水势阈值为-30 kPa WUE 最高,娄玉穗等^[27]认为巨峰葡萄在萌芽至果实生长前、坐果至着色、着色后适宜的阈值指标分别为-10、-15和-20 kPa,但这些研究以传统的土壤水分张力计进行测定费时费力,以土壤水势阈值梯度进行研究没有考虑根系分布范围和葡萄实际生产的需水规律。基于上述情况,本研究选择土壤水分张力原理的传感器建立阈值具有度数精准、不受土壤结构影响等特点,可以避免不同土壤类型和结构的扰乱,并且结合葡萄生长过程中的需水规律以距离主根水平0~10 cm、垂直10~20 cm的吸收根分布范围进行监测,并设置阈值进行试验。研究结果显示,萌芽至开花前土壤水分压力不超过30 kPa,果实生长期适当进行水分亏缺,但土壤水分压力不超过200 kPa作为灌溉决策阈值指标,全生育期总灌溉次数增加5次,而灌溉量可控制到2016 t/hm²,按照设施葡萄水量平衡方法,基本能够实现水分平衡。

2019年全年管理中,根据土壤条件和单位产量养分吸收量确定的养分投入指标中没有投入磷肥,但产量并没有减少,反而增加到27.27 t/hm²,这一原因主要是由于土壤中磷含量过高,达到86.06 mg/kg,而土壤有效磷含量丰缺指标>40 mg/kg,为极高水平,必须要考虑土壤磷钾含量过量的问题。而从氮钾的投入来看,投入总量基本与果实携走量一致,其中存在少许偏差在于本试验没有对水肥一体化技术中肥料溶液的浓度进行控制,因此肥料的投入量与水分之间的耦合关系还有优化空间。但总体而言,在设施果园中,由于常年大量投入养分,普遍存在土壤养分盈余,尤其是磷钾等,基于养分吸收规律和土壤测试的施肥决策体系具有普遍应用的价值。

在智能滴灌施肥体系中,NB-IoT网络支持低功耗、高连接要求的传感器设备进行高效连接,传感器实时监测的流量费用大大降低且待机时间更长。装配基于NB-IoT网络的eVineyard一体式传感器以15 min/次的频率进行实时监测能够满足及时决策和控制的要求,同时开发手机端控制体系进行远程控制,以简易的施肥罐和智能化电磁阀、智能水表建立灌溉施肥自动控制使低成本的水肥一体化应用成为可能,可以预见,未来低成本高效率的

NB-IoT网络和支持设备将有广阔的发展空间。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [2] 王海波, 王孝娣, 王宝亮, 等. 中国设施葡萄产业现状及发展对策[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2009(9): 61-65.
- [3] 李传哲, 许仙菊, 马洪波, 等. 水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 469-475.
- [4] 林华, 李疆. 干旱荒漠地区葡萄滴灌试验[J]. 新疆农业大学学报, 2003(4): 62-64.
- [5] 杜中平. 以色列节水灌溉与水肥一体化考察报告[J]. 青海农林科技, 2012(4): 17-20.
- [6] 李咏梅, 任军, 刘慧涛, 等. 以色列“水肥一体化”技术简介与启示[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(3): 91-93.
- [7] 苏培玺, 施来成. 塑料薄膜滴灌带在沙地葡萄节水中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 94-98.
- [8] 钟辉, 钟公治, 杨筠文, 等. 生长后期节水灌溉对葡萄产量及品质的影响试验初探[J]. 南方园艺, 2010, 21(5): 14-15.
- [9] 黄冠华, 沈荣开, 张瑜芳. 作物水分生产函数与农田非充分灌溉研究述评[J]. 水科学进展, 1995(3): 248-254.
- [10] 梁鹏. 部分根域干燥栽培条件下葡萄树体生长及根域土壤水分调控研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [11] 刘洪光, 何新林, 王雅琴, 等. 调亏灌溉对滴灌葡萄耗水规律及产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 109-111.
- [12] Souli K X, Elmaloglou S, Dercas N. Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems[J]. Agricultural Water Management, 2015, 148(31): 258-268.
- [13] 宗哲英, 王帅, 王海超, 等. 水肥一体化技术在设施农业中的研究与建议[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 97-100.
- [14] Shock C, Pereira A, Feibert E. Field comparison of soil moisture sensing using neutron thermalization, frequency domain, Tensiometer, and Granular Matrix Sensor Devices: Relevance to precision irrigation[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2016, 8(2): 154-167.
- [15] Millán S, Casadesús J, Campillo C, et al. Using soil moisture sensors for automated irrigation scheduling in a plum crop[J]. Water, 2019, 11(10): 2061.
- [16] Hartz T. Drip irrigation and fertigation management of celery[M]. California: University of California Cooperative Extension, 1999.
- [17] Basso B, Antle J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(4): 254-256.
- [18] Irmak S, Payero J O, Van De Walle B, et al. Principles

- and operational characteristics of Watermark granular matrix sensor to measure soil water status and its practical applications for irrigation management in various soil textures [J]. *Biological Systems Engineering*, 2014, 26 (9): 1–14.
- [19] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009. 96–99.
- [20] Haise H R, Hagan R M. Soil, plant, and evaporative measurements as criteria for scheduling irrigation [J]. *Irrigation of Agricultural Lands*, 1967, 11: 575–604.
- [21] Brouwer C, Prins K, Kay M, et al. Irrigation water management: irrigation methods [J]. *Training Manual*, 1988, 9 (5): 5–7.
- [22] 史岩, 李帆, 孙凯, 等. 墒情监测中土壤水分传感器埋设位置研究 [J]. *莱阳农学院学报*, 2006 (3): 179–184.
- [23] 杨绍辉, 王一鸣, 孙凯. 基于土壤含水率垂向变化规律的水分传感器布设 [J]. *农业机械学报*, 2008 (5): 104–107.
- [24] Cancela J, Fandiño M, Rey B, et al. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Mencía) [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 151: 52–63.
- [25] Abrisqueta I, Vera J, Tapia L, et al. Soil water content criteria for peach trees water stress detection during the postharvest period [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 104: 62–67.
- [26] Zsofi Z, Toth E, Varadi G, et al. The effect of progressive drought on water relations and photosynthetic performance of two grapevine cultivars (*Vitis vinifera* L.) [J]. *Acta Biologica Szegediensis*, 2008, 52 (2): 321–322.
- [27] 娄玉穗, 王世平, 苗玉彬, 等. 不同灌溉阈值对‘巨峰’葡萄树体生长与果实品质的影响 [J]. *果树学报*, 2018, 35 (1): 46–55.

Research on intelligent water and fertilizer management system of greenhouse grape

LI Zeng-yuan¹, WANG Shao-lei², JI Ting-ting¹, ZHANG Wei-feng^{1*} (1. College of Resources and Environment, China Agricultural University/Institute of Agricultural Green Development, China Agricultural University/College of Agricultural Green Development, China Agricultural University, Beijing 100193; 2. Quzhou Experimental Station, China Agricultural University, Quzhou Hebei 057250)

Abstract: The blind investment of water and fertilizer is a serious problem in protected viticulture at present, because of the lack of irrigation decision-making standard, it is difficult for farmers to apply water and fertilizer integration technology in practice. In this study, eVineyard integrated sensor based on NB-IoT network was used to monitor soil moisture of greenhouse grape root system in real-time, and the irrigation decision-making index of greenhouse grape based on soil moisture pressure was established, and relying on water and fertilizer integration equipment to achieve automatic irrigation. The results showed that, compared with the famer management, the ear weight of the integrated management of intelligent irrigation and fertilization was increased by 161 g, the yield was increased by 20.2 t/hm², the content of soluble solids increased by 31.1%, acid content was decreased by 21.9%, and vitamin C content was increased by 4.13 mg/100 g. Compared with farmer's drip irrigation, the water-saving efficiency reached 33.3%, water consumption dropped to 2016 t/hm², and the total cost of irrigation and fertilization saved by 32.2%. Water balance can be achieved by setting irrigation decision-making index with soil water pressure less than 30 kPa in germination to flowering and less than 200 kPa in fruit growth, according to the nutrient supply of soil and the nutrient absorption of crop target yield and the fertilizer input quota can be used for the intelligent management of grape water and fertilizer integrated system.

Key words: intelligent; water and fertilizer management; sensor; irrigation decision-making