

基于 Meta 分析的调控灌溉对中国北方葡萄产量及灌溉水分利用效率的影响研究

杨凡^{1,2}, 刘园^{1*}, 刘布春¹, 杨兴元², 朱永昶¹, 刘珊珊¹, 刘观止¹, 崔成¹

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2. 新疆农业大学 食品科学与药学学院, 乌鲁木齐 710048)

摘要: 【目的】分析调控灌溉对中国北方葡萄产量及水分利用效率的影响, 评价葡萄最佳灌溉定额的合理性。【方法】以充分灌溉为对照, 基于 59 篇公开发表的学术论文中的 316 组葡萄产量与灌溉水分利用效率观测数据, 采用 Meta 分析对调控灌溉条件下的田间试验结果进行分析, 通过回归分析与亚组分析探讨了调控灌溉对葡萄产量和灌溉水分利用效率的影响; 基于反距离权重法对最佳灌溉定额进行插值得到区域最佳灌溉定额。【结果】与充分灌溉相比, 调控灌溉导致中国北方葡萄减产 710.37 kg/hm², 灌溉水分利用效率提高 1.19 kg/m³。不同葡萄品种的灌溉水分利用效率对调控灌溉的响应不同, “阳光玫瑰”正效应最强, 为 30.13 kg/m³; 鲜食葡萄比酿酒葡萄的灌溉水分利用效率高 61%。在壤土和砂质土壤园区, 全生育期或着色成熟期的轻度调控灌溉更有利于稳产。【结论】调控灌溉下的中国北方葡萄产量降低但品质有所提高, 葡萄最佳灌溉定额与生育期水分缺额基本匹配。

关键词: 调控灌溉; 葡萄; 中国北方; 灌溉水分利用效率; Meta 分析

中图分类号: S36

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022458

OSID: 

杨凡, 刘园, 刘布春, 等. 基于 Meta 分析的调控灌溉对中国北方葡萄产量及灌溉水分利用效率的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 53-58.

YANG Fan, LIU Yuan, LIU Buchun, et al. Meta-analysis of the Effect of Regulated Irrigation on Yield and Irrigation Water Use Efficiency of Grapes in Northern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 53-58.

0 引言

【研究意义】中国北方葡萄种植面积占全国葡萄种植总面积的 58%^[1], 产量占全国葡萄总产量的 70%^[2]。然而, 中国北方属于干旱或半干旱区, 葡萄生育期内降水量普遍不足, 需补充灌溉以保证其正常的生长发育。最佳灌溉制度不仅需保障葡萄产量与品质, 还需考虑灌溉水分利用效率 (WUE)。国内专家为探索葡萄最优灌溉制度, 开展了大量田间试验研究, 发现主动为植株施加水分胁迫的调控灌溉技术是葡萄节水、增产、提质的有效水分管理措施之一^[3]。受气候、品种、栽培管理措施以及果园条件等因素的影响和限制, 多数葡萄果园试验得到的最优灌溉定额、最优灌溉制度、最佳灌溉方式存在区域异质性。因此, 本研究对已公开发表的中国北方葡萄灌溉文献进行回顾和系统分析, 评价现行灌溉制度的合理性, 以期

为中国北方葡萄节水增效、增产和保质提供科学参考。

【研究进展】自 20 世纪 90 年代以来, 国内学者在中国北方不同地区开展了果园葡萄节水试验。赵金龙等^[4]在流沙地开展了葡萄滴灌试验, 得出 669 L/a 的滴灌量可以促进巨峰葡萄的生长发育, 相比沟灌节水 72%。针对不同灌溉方式和灌溉技术, 学者又开展了一系列田间试验, 如大水漫灌、滴灌、沟灌、渗灌、小管出流灌等^[4-14]; 大量的田间试验明确了调控灌溉技术对葡萄产量、品质的影响。随着研究的不断深入, 张振文等^[11]认为葡萄果实着色到采收期时, 采用调控灌溉技术可比常规灌溉方式节水 36%, 且对葡萄浆果品质具有促进作用。房玉林等^[3]发现, 调控灌溉不仅节水, 而且能够有效提高果实品质。邓浩亮等^[12]认为, 葡萄萌芽期耗水强度最小, 浆果膨大期耗水强度最大, 着色成熟期中度水分胁迫最有利于葡萄品质的提高。张玥等^[13]通过减少 50% 的灌溉量和灌溉次数, 发现寒香蜜和紫甜无核葡萄的可溶性固形物量和果皮中酚类物质的量增加显著。李昭楠等^[14]认为, 西北干旱荒漠气候区葡萄全生育期需灌溉 12 次 10~20 mm 的水量, 结合覆膜技术可显著提高葡萄水分利用效率和产量。【切入点】前人的研究结果侧重于灌溉量对果园尺度不同葡萄品种的生理、产量和品质的影响, 与区

收稿日期: 2022-08-17 修回日期: 2023-02-07 网络出版日期: 2023-05-05

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2017YFC1502803); 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-2014-IEDA)

作者简介: 杨凡 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事农业气象灾害与葡萄栽培研究。E-mail: 914818105@qq.com

通信作者: 刘园 (1983-), 女, 副研究员, 主要从事农业气象灾害风险评估研究。E-mail: liuyuan@caas.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

域气候条件相结合的研究较少, 结论普适性较低, 不利于区域推广。

【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究基于 Meta 分析, 通过回顾以往公开发表的中国北方区域葡萄田间试验研究, 定量分析调控灌溉技术对北方葡萄产量及灌溉水分利用效率的影响。结合区域气候特征, 探明葡萄的生育期水分缺额及最佳灌溉定额, 综合评价果园试验最佳灌溉定额的区域合理性, 以期为我国北方葡萄种植提供最佳的调控灌溉技术模式。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究基于中国知网数据库, 以“葡萄”、“灌溉”为关键词, 搜集了自 2000 年以来公开发表的关于中国北方不同灌溉条件下葡萄产量和水分利用效率的学术论文和学位论文。为了得到有效的田间试验数据, 进一步对搜集的文献进行分类筛选, 具体标准如下: ① 试验区位于我国秦岭-淮河线以北区域; ② 盆栽、水分池及设有防雨棚的试验均被排除; ③ 试验设计是围绕葡萄调控灌溉技术开展, 且具有相应的充分灌溉或近似灌溉处理作为对照组 (非调控灌溉), 具有相应的调控灌溉为试验组, 或经试验得到最佳灌溉定额; ④ 田间试验至少列出 2 种处理下的葡萄产量或水分利用效率的平均值、标准差和样本量, 灌溉量、产量和水分利用效率至少包括 2 个及以上指标。经过严格筛选和复核, 共获取到中国北方新疆维吾尔自治区、甘肃省、宁夏回族自治区、陕西省、河北省、北京市、辽宁省、吉林省 8 个省 (市) 的葡萄灌溉试验的中文文献 59 篇。

提取文献中的试验地点、土壤田间持水率、葡萄品种、树龄、灌溉方式、调控时期、最优灌溉定额。文献中的数据以表格、柱状图与折线图 3 种方式呈现, 对表格中的数据直接提取; 对以柱状图或折线图形式呈现的数据, 采用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件进行数字化转换后再提取。总结归纳同类数据,

表 1 调控灌溉对葡萄产量和灌溉水分利用效率的综合效应分析

Table 1 Effect of regulated deficit irrigation on grape yield and WUE

指标	均值差	置信区间		Z	p	Q	p _Q	I ² /%
		下限	上限					
产量	-710.37	-1 130.98	-290.16	-3.31	0.000 9	92.67	<0.000 1	51.4
WUE	1.19	0.77	1.62	-7.22	<0.000 1	575.65	0.016 8	92.4

注 Z、Q、p 分别表示 Z 检验、Q 检验及显著性统计量。

2.2 调控灌溉对北方葡萄产量、灌溉水分利用效率影响的异质性分析

基于 316 对调控灌溉与充分灌溉的中国北方葡萄产量及灌溉水分利用效率的对比数据, 按照不同分组进行回归分析及亚组分析, 如图 1 所示。

将葡萄全生育期分为萌芽期、开花期、新梢生长期、膨大期、着色成熟期 5 个关键生育期; 灌溉方式按照漫灌、沟灌、微喷灌、小管出流灌、滴灌、渗灌 6 种进行分类, 用于统计分析。

1.2 研究方法

利用 Excel 和 R studio 软件对数据进行处理、分析。利用 ArcMAP 10.8 软件, 依据中国秦岭—淮河分界线对中国地理底图 (来源于自然资源部标准地图服务系统底图, 审图号为 GS(2019)1822 号) 进行裁剪。基于 Meta 分析, 采用随机效应模型计算加权均值差 (MD) 作为产量和灌溉水分利用效率 (WUE) 的效应量, 并进行异质性检验、回归分析和亚组分析。以生育期水分缺额反映研究时段内葡萄需水量与降水量的差异, 得到的点数据通过反距离权重法 (IDW) 插值得到最佳灌溉定额的区域分布^[15-17]。

2 结果与分析

2.1 调控灌溉对北方葡萄产量、灌溉水分利用效率的综合效应分析

将收集到的有效数据依据是否使用调控措施再次筛选, 得到 45 对数据。将每个试验的不同处理次数视为重复次数, 计算其标准偏差。部分试验中对对照组仅有 1 个处理, 则参考文献[17], 假定偏差为平均值的 10% 进行 Meta 分析。调控灌溉对葡萄产量和灌溉水分利用效率的 Meta 分析结果如表 1 所示。中国北方葡萄调控灌溉相比充分灌溉平均减产 710.37 kg/hm² ($p < 0.05$, 95% 的置信区间为 -1 130.59 ~ -290.16 kg/hm²), 灌溉水分利用效率平均增加 1.19 kg/m³ ($p < 0.001$, 95% 的置信区间为 0.77 ~ 1.62 kg/m³)。I² 分别为 51.4%、92.4%, 异质性均大于 50%, 表明所纳入的各研究间存在异质性, 需要确定异质性来源。因此, 进一步分析葡萄品种、土壤质地、田间持水量、树龄、调控程度等因素影响下的葡萄产量和水分利用效率对调控灌溉的响应。

由表 2 可知, 葡萄品种、调控程度、品种大类、土壤类型、调控时间均不同程度地影响 WUE, 解释了其 7.44% 的异质性。调控程度、土壤类型、田间持水率不同程度地影响产量, 解释了其 18.37% 的异质性。

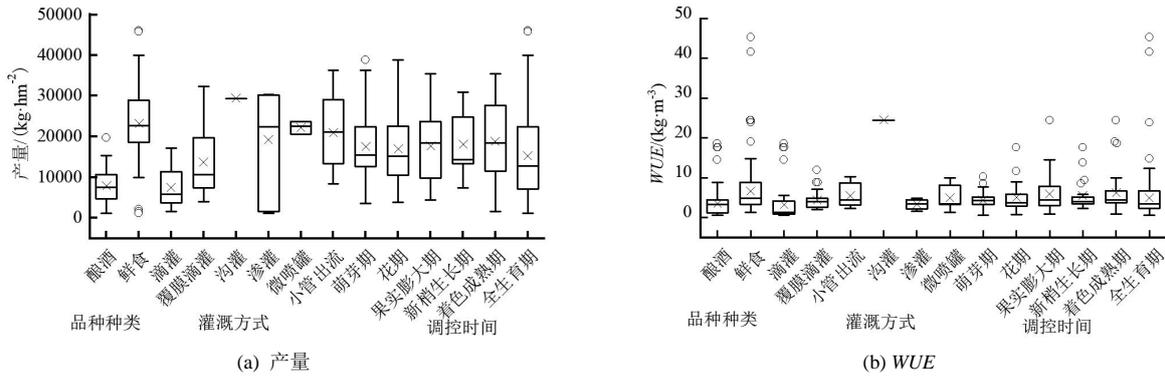


图 1 中国北方葡萄不同分类下的产量与 WUE

Fig.1 Yield and WUE under different grape classifications in North China

表 2 调控灌溉下中国北方葡萄产量与水分利用效率的异质性分析

Table 2 Heterogeneity analysis of irrigated grape yield and WUE in North China

指标	系数绝对值		指标	系数绝对值	
	MD _{WUE}	MD _{Yield}		MD _{WUE}	MD _{Yield}
截距	1.70*	4 435.50**	田间持水率	0.02	73.94*
品种种类	0.61*	420.45	灌溉方式	0.04	109.62
品种	0.04	51.16	调控程度	0.30*	1 012.38***
区域	0.07	223.11	调控时间	0.16*	36.63
土壤类型	0.34***	629.07**	解释异质性(R ²)	7.44%	18.37%
树龄	0.01	104.17			

注 *、**、***分别表示在 5%、1%、0.1%水平上显著。

根据 Meta 回归分析结果对相关因素进行多次亚组分析。不同分类下调控灌溉对葡萄 WUE 影响的结

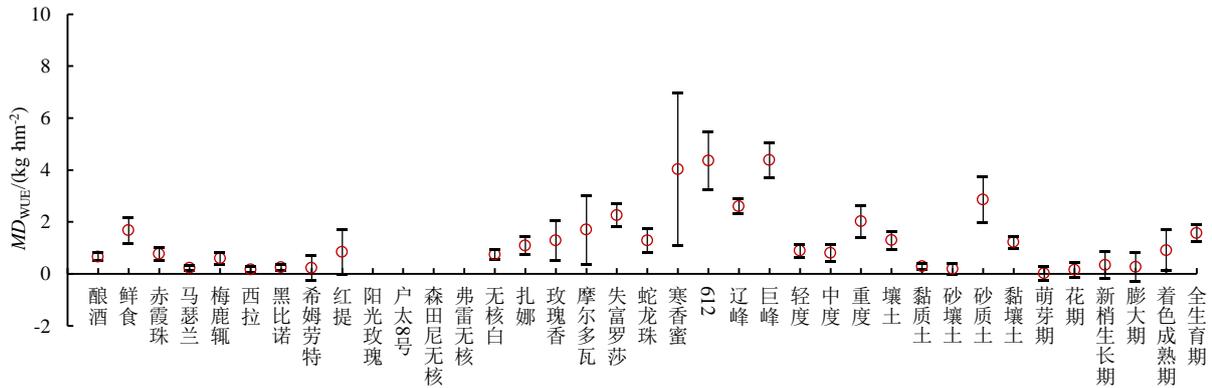


图 2 调控灌溉措施下不同因素对中国北方葡萄 WUE 影响

Fig.2 Effects of different factors on WUE of grape in North China under controlled regulated irrigation

调控灌溉下，不同因素对葡萄产量的影响如图 3 所示。砂壤土与黏质土对葡萄产量具有显著负效应，分别为-1 844.56、-1 067.57 kg/hm²。在 20%~30% 的土壤田间持水率下，调控灌溉对葡萄产量表现出最高的负效应，为-1 233.85 kg/hm²。中度与重度调控灌溉分别使葡萄产量减少 1 130.78、1 330.74 kg/hm²。

2.3 中国北方葡萄最佳灌溉定额的区域化分析

基于不同试验环境与管理措施，前人得到了北方葡萄最佳灌溉定额的点数据，其中低于 500 mm 共 32 个站点，主要分布在甘肃、陕西和河北；最佳灌溉定

果如图 2 所示。与充分灌溉相对比，全生育期、着色成熟期的调控灌溉对 WUE 具有显著的正效应，分别使葡萄 WUE 增加 1.57、0.91 kg/m³。除砂壤土外，不同土壤类型均对葡萄 WUE 具有显著的正效应。不同程度的调控灌溉均对葡萄 WUE 具有显著的正效应。调控灌溉下，仅“户太 8 号”的 WUE 显著降低了 0.62 kg/m³（95%置信区间为-0.89~-0.35 kg/m³）；在具有显著正效应的结果中，鲜食葡萄“阳光玫瑰”、“巨峰”、“辽峰”、“612”和“寒香蜜”表现出更高的正效应（>2.5 kg/m³），“阳光玫瑰”的 WUE 受调控灌溉影响最大，为 30.13 kg/m³（95%置信区间为 25.25~35.01 kg/m³）。调控灌溉使鲜食葡萄 WUE 平均提高 1.68 kg/m³，使酿酒葡萄 WUE 平均提高 0.66 kg/m³。

额在 500~1 500 mm 之间的共有 8 个果园，主要分布在新疆、宁夏。

利用反距离权重法得到中国北方酿酒葡萄及鲜食葡萄最佳灌溉量的区域分布，如图 4(a)和图 4(b)所示。中国北方酿酒葡萄全生育期最佳灌溉定额均介于 200~500 mm 之间，呈自南向北逐渐减少的趋势，黄土高原区所需灌溉量较高，在 300~500 mm 之间，平均值为 356 mm。鲜食葡萄全生育期的最佳灌溉定额呈自东向西的增加趋势。中国北方葡萄生育期水分缺额如图 4(c)所示。吉林、辽宁南部、陕西南部、

甘肃西南部、河北东部地区的葡萄全生育期水分缺额为负值，即降水基本可满足葡萄生长发育需求；其余

地区葡萄全生育期水分缺额 > 0 mm，表明需要补充灌溉以满足葡萄生长发育。

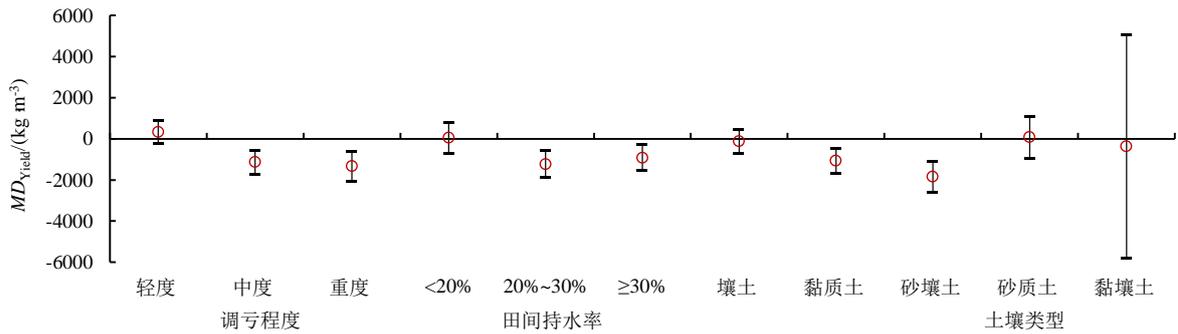


图3 调控灌溉措施下不同因素对中国北方葡萄产量影响

Fig.3 Effects of different factors on yield of grape in North China under controlled regulated irrigation

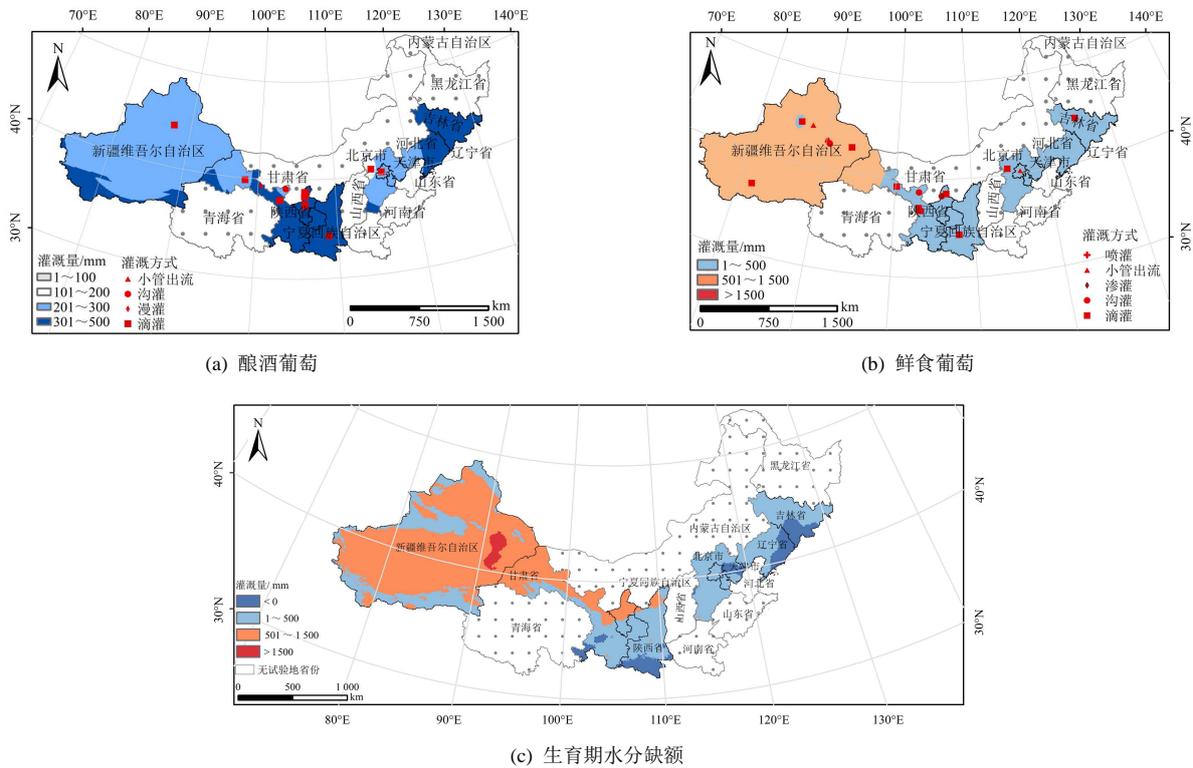


图4 中国北方葡萄最佳灌溉定额和生育期水分缺额空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the actual optimum irrigation amount and water deficit during growth period during grape growing season in North China

3 讨论

定量分析调控灌溉对葡萄产量及 WUE 的影响，对农业水资源的高效利用具有重要意义。Meta 分析可将已有研究进行归纳总结，并将众多影响因素作为协变量进行分析，但在大量纳入分析的数据中，灌溉定额为试验因素，因此并未将其列入 Meta 分析的影响因素中，仅提取各试验点得到的最佳灌溉定额进行反距离权重插值得到中国北方葡萄灌溉定额区域分布。所纳入的文献中，不同试验年的降水量不同，可能会造成一定误差。

随着田间持水率的增加，葡萄产量呈先升高后降低再升高的变化趋势，总结试验条件发现，葡萄根系

在砂土的生长与定植方向基本一致，葡萄根系更易吸收水分， WUE 也更高；而在灌淤土壤中根系垂直方向延伸较快，在没有明显钙积层阻隔的情况下，根系生长速度与灰钙土分布深度有关^[18]。在所有纳入研究的葡萄品种中，仅“户太八号”的 WUE 在调控灌溉下呈显著负效应，可能是由于“户太八号”是高产品种，通过牺牲一定的产量来提高 WUE 并不可行^[19]。除产量与 WUE 外，提升葡萄品质也是栽培管理的目的之一。调控灌溉主要集中对 WUE 的研究，对葡萄品质研究较少，品质因子中又侧重于调控灌溉对葡萄糖酸类物质影响的研究，对葡萄总酚、花色苷、单宁及鲜食葡萄的粒径、维生素 C 等一系列品质关注较少，所以本研究中未将其列入研究范围。我国北方葡萄最

佳灌溉定额的空间分布与生育期水分缺额基本吻合，与李雅善^[20]基于水分亏缺指数的宁夏酿酒葡萄各生育期早情等级空间分布类似。最优灌溉定额区间略低于生育期水分缺额，造成这种差异的原因可能是葡萄不同生育期降水分布不均^[21-25]。黄土高原区酿酒葡萄的最优灌溉定额高于鲜食葡萄的最优灌溉定额，可能是研究站点和试验年份的不同所致。

4 结论

1) 与充分灌溉相比，调控灌溉使中国北方葡萄减产 710.37 kg/hm²，灌溉水分利用效率提高 1.19 kg/m³。

2) 鲜食葡萄比酿酒葡萄对调控灌溉更敏感，WUE 可提高 61%。

3) 中国北方酿酒葡萄最佳灌溉定额介于 200~500 mm 之间，新疆区鲜食葡萄最佳灌溉定额介于 500~1 500 mm 之间。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献：

[1] 李小红, 李运景, 马晓青, 等. 我国葡萄产业发展现状与展望[J]. 中国南方果树, 2021, 50(5): 161-166.
LI Xiaohong, LI Yunjing, MA Xiaoqing, et al. Present situation and prospect of grape industry development in China[J]. South China Fruits, 2021, 50(5): 161-166.

[2] 宋晓倩. 遥感数据与气象数据相融合的葡萄种植面积测算技术研究与应用[D]. 银川: 北方民族大学, 2019.
SONG Xiaoqian. Research and application of grape planting area measurement technology based on remote sensing data and meteorological data[D]. Yinchuan: Beifang University of Nationalities, 2019.

[3] 房玉林, 孙伟, 万力, 等. 调亏灌溉对酿酒葡萄生长及果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(13): 2 730-2 738.
FANG Yulin, SUN Wei, WAN Li, et al. Effects of regulated deficit irrigation (RDI) on wine grape growth and fruit quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(13): 2 730-2 738.

[4] 赵金龙. 流沙地葡萄滴灌试验初报[J]. 中国沙漠, 1992, 12(3): 59-64.
ZHAO Jinlong. Preliminary report on drip irrigation experiment of grape in quicksand land[J]. Journal of Desert Research, 1992, 12(3): 59-64.

[5] 周军, 兰彦萍, 齐建勋, 等. 灌溉方式对葡萄果实品质及矿质营养元素的影响[J]. 宁夏农林科技, 2001, 42(3): 10.
ZHOU Jun, LAN Yanping, QI Jianxun, et al. Effects of irrigation methods on grape fruit quality and mineral nutrients[J]. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2001, 42(3): 10.

[6] 杜太生, 康绍忠, 夏桂敏, 等. 滴灌条件下不同根区交替湿润对葡萄生长和水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 43-48.
DU Taisheng, KANG Shaozhong, XIA Guimin, et al. Response of grapevine growth and water use to different partial root-zone drying patterns under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(11): 43-48.

[7] 毛娟, 陈佰鸿, 曹建东, 等. 不同滴灌方式对荒漠区‘赤霞珠’葡萄根系分布的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3 084-3 090.
MAO Juan, CHEN Baihong, CAO Jiandong, et al. Effects of different drip irrigation modes on root distribution of wine grape ‘Cabernet Sauvignon’in Desert area of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,

2013, 24(11): 3 084-3 090.

[8] 张建丰, 李涛, 张江辉, 等. 极端干旱区成龄葡萄深层坑渗灌技术研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 69-71.
ZHANG Jianfeng, LI Tao, ZHANG Jianghui, et al. Technique factors of the deep pit infiltration irrigation for mature grapes in extremely arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 69-71.

[9] 孙伊博, 张清涛, 王焱, 等. 旱区“环状毛细芯渗灌”对葡萄生长发育和果实品质的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 1-8.
SUN Yibo, ZHANG Qingtao, WANG Yao, et al. Influence research on infiltration irrigation by annular capillary wicking to growing development and fruit quality of grape in arid region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 1-8.

[10] 严大义, 张开春, 叶金伟. 葡萄水分胁迫反应的研究[J]. 葡萄栽培与酿酒, 1994(4): 14-16.
YAN Dayi, ZHANG Kaichun, YE Jinwei. Study on water stress response of grape[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 1994(4): 14-16.

[11] 张振文, 李华, 宋长冰. 节水灌溉对葡萄及葡萄酒质量的影响[J]. 园艺学报, 2002, 29(6): 515-518.
ZHANG Zhenwen, LI Hua, SONG Changbing. Effects of irrigation on grape and wine[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(6): 515-518.

[12] 邓浩亮, 孔维萍, 张恒嘉, 等. 不同生育期调亏灌溉对酿酒葡萄耗水及果实品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1 196-1 205.
DENG Haoliang, KONG Weiping, ZHANG Hengjia, et al. Effect of regulated deficit irrigation at different growth stages on water consumption and fruit quality of wine grape[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9): 1 196-1 205.

[13] 张钥, 王呈阳, 周嘉玲, 等. 不同水分调亏处理对葡萄果皮酚类物质的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(8): 1 296-1 307.
ZHANG Yue, WANG Chengyang, ZHOU Jialing, et al. Effects of different regulated deficit irrigation treatments on phenols in grape berries[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(8): 1 296-1 307.

[14] 李昭楠, 李唯, 姜有虎, 等. 西北干旱区戈壁葡萄膜下滴灌需水量和灌溉制度[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 247-251.
LI Zhaonan, LI Wei, JIANG Youhu, et al. Water demand and irrigation schedule of drip irrigation for Gobi grape under plastic mulch in Northwest arid region of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 247-251.

[15] REN T J, LI Y E, MIAO T T, et al. Characteristics and driving factors of nitrogen-use efficiency in Chinese greenhouse tomato cultivation[J]. Sustainability, 2022, 14(2): 805.

[16] 韩帅. 基于多源融合数据的中国 1979—2018 年葡萄气候区划及风险防范技术集成研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
HAN Shuai. Study on grape climate zoning and risk prevention technology integration in China from 1979 to 2018 based on multi-source fusion data[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.

[17] 丁蓓蓓, 张雪靓, 赵振庭, 等. 华北平原限水灌溉条件下冬小麦产量及水分利用效率变化的 Meta 分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 7-17.
DING Beibei, ZHANG Xueliang, ZHAO Zhengting, et al. Change in winter wheat yield and its water use efficiency as affected by limited irrigation in North China plain: A meta-analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 7-17.

[18] 李玉鼎, 张光弟, 任立冬, 等. 贺兰山东麓地区酿酒葡萄根系在不同土壤类型上的分布状况[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2007(2): 26-29.
LI Yuding, ZHANG Guangdi, REN Lidong, et al. Distribution of root system of wine grape on different soil types in the Eastern foot of Helan Mountain[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2007(2): 26-29.

[19] 纪检. 葡萄新品种-户太八号[J]. 陕西林业科技, 1996(2): 73.
JI Jian. Hutai No.8, a new grape variety[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 1996(2): 73.

[20] 李雅善, 李华, 王华, 等. 基于作物水分亏缺指数的宁夏酿酒葡萄干

- 早时空差异分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 203-211.
- LI Yashan, LI Hua, WANG Hua, et al. Spatiotemporal difference analysis of drought on wine grape in Ningxia based on crop water deficit index[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 203-211.
- [21] 王凯, 宋文彩, 罗宇晨, 等. 玛纳斯地区不同树龄赤霞珠葡萄根系分布的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 138-144.
- WANG Kai, SONG Wencai, LUO Yuchen, et al. Distribution of Cabernet Sauvignon grape roots in Manas region[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, 43(10): 138-144.
- [22] 余昭君, 胡笑涛, 冉辉, 等. 基于波文比-能量平衡法的半湿润地区葡萄园蒸发蒸腾量估算[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 175-183.
- YU Zhaojun, HU Xiaotao, RAN Hui, et al. Estimation of grape evapotranspiration in semi-humid region based on Bowen ratio energy balance method[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 175-183.
- [23] 侯裕生. 水肥耦合对吐哈盆地滴灌葡萄生理生长及产量品质影响效应研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
- HOU Yusheng. Effect of water and fertilizer coupling on physiological growth, yield and quality of drip irrigation grapes in Turpan-Hami Basin[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.
- [24] 王尚涛. 干旱绿洲区农田葡萄树蒸散耗水及水分利用策略研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- WANG Shangtao. Study on evapotranspiration water consumption and water utilization strategy of farmland vines in arid oasis area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [25] 李新红. 全国农业灌溉需水量及区域特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- LI Xinhong. Study on national agricultural irrigation water demand and regional characteristics[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.

Meta-analysis of the Effect of Regulated Irrigation on Yield and Irrigation Water Use Efficiency of Grapes in Northern China

YANG Fan^{1,2}, LIU Yuan^{1*}, LIU Buchun¹, YANG Xingyuan²,
ZHU Yongchang¹, LIU Shanshan¹, LIU Guanzhi¹, CUI Cheng¹

(1. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** Regulated irrigation has become a technology widely used in semi-arid regions in northern and northwestern China. Using meta-analysis, this paper analyzes the impact regulated irrigation on yield and irrigation water use efficiency of grapes, based on data obtained from various vineyards in these regions. **【Method】** With sufficient irrigation taken as the control (CK), 316 experimental datasets collected from 59 published studies were used for analysis. Factors that influence the impact of regulated irrigation on grape yield and irrigation water use efficiency were analyzed using regression and subgroup analysis. The optimal irrigation amount for each experiment was calculated using the inverse distance weight method, from which we created an optimal regulated irrigation map for grapes in the regions. **【Result】** Compared with CK, regulated irrigation reduced the grape yield by 710.37 kg/hm², but increased fruit quality and irrigation water use efficiency by 1.19 kg/m³. The change in irrigation water use efficiency with regulated irrigation varied with grape variety. For example, regulated irrigation increased the water use efficiency of the Hutai8 variety only by 0.62 kg/m³ ($p < 0.05$), but the Sunshine Rose variety by 30.13 kg/m³ ($p < 0.05$). On average, regulated irrigation increased water use efficiency of table grapes by 61% more than that of wine grapes. The impact of regulated irrigation also varied with soil texture. For loam and sandy soils, a moderate regulated irrigation during the whole growth season or at the coloring maturity stage was more efficient. **【Conclusion】** Regulated irrigation reduced the yield of grapes in northern China, but increased fruit quality and water use efficiency. The optimal irrigation amount was consistent with water deficit during the growth season of the grapes.

Key words: regulated deficit irrigation; grape; Northern China; irrigation water use efficiency; Meta analysis

责任编辑: 韩洋