

基于 Meta 分析的中国灌溉冬小麦产量及水分利用效率影响因素研究

武亚梅^{1,2}, 朱金铤³, 朱德兰^{1,2*}, 李 丹^{1,2}

(1.西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3.青海省水利水电勘测设计研究院, 西宁 810001)

摘 要:【目的】目前针对灌溉冬小麦产量与水分利用效率影响因素的研究大多集中于某一特定区域, 研究结果零散, 针对上述问题, 揭示宏观尺度下灌溉冬小麦产量和水分利用效率的影响因素。【方法】综合已发表的田间试验数据, 采用 Meta 分析方法得出灌溉在不同地区的增产效应和水分效应, 在异质性检验的基础上, 通过 Meta 亚组分析探究灌溉定额、降雨量和平均气温等对冬小麦产量和水分利用效率的影响机制。【结果】与生育期不灌溉相比, 灌溉使冬小麦总体增产 39.34%, 水分利用效率提高 3.39%; 增产率随灌溉定额的增加而增大, 增幅最终趋于稳定, 水分利用效率随灌溉定额的增加呈先增加后减少的趋势, 当灌溉定额>240 mm 时, 冬小麦相对水分利用效率变化率显著降低 11.29%; 随着生育期平均温度上升, 灌溉冬小麦增产效应显著提高, 生育期均温>9℃时, 冬小麦增产率高达 45.81%; 生育期降雨量对灌溉冬小麦产量影响显著, 生育期降雨量处于干旱年份时灌溉增产效应最明显, 增产率为 72.48%。

【结论】灌溉定额为 60~120 mm 更有利于提高冬小麦产量和水分利用效率。

关键词: 冬小麦; 产量; 水分利用效率; Meta 分析; 灌溉定额; 气象因子

中图分类号: S11+4; S512

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019049

武亚梅, 朱金铤, 朱德兰, 等. 基于 Meta 分析的中国灌溉冬小麦产量及水分利用效率影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 84-92.

WU Yamei, ZHU Jintin, ZHU Delan, et al. Meta-analysis on influencing factors of irrigated winter wheat yield and water use efficiency in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 84-92.

0 引言

冬小麦是中国主要粮食作物之一, 确保其生产可持续发展对保障我国粮食安全意义重大。研究发现, 旱作条件下, 中国北方冬小麦区水分亏缺比较严重, 冬小麦生育阶段降水条件不能满足其正常生长发育需求, 因此针对不同地区、不同气候条件下如何提高冬小麦产量与水分利用效率的研究是众多学者关注的议题。国内外学者通过田间试验及数学方法对不同因素对灌溉冬小麦产量与水分利用效率的影响进行了大量研究^[1-4], 周丽丽等^[5]研究发现, 冬小麦产量随灌溉定额的增加而增加, 诸多学者认为降水、气温和日照等气象因子影响冬小麦产量^[6-7]。姚玉璧等^[8]分析

气象因子与冬小麦水分利用效率间的关系, 结果表明冬小麦水分利用率与返青期和成熟期气温成正比, 代立芹等^[2]研究发现黄淮海北部麦区产量主要受各生育期气温和日照以及拔节-抽穗期降水量的影响。诸多研究表明, 在多数情况下灌溉并不能增加水分利用效率^[8-10], 杨文稼等^[10]研究表明, 灌溉冬小麦的水分利用效率受生育期降雨量影响显著, 认为在半干旱地区, 只有在干旱年份灌溉才能提高水分利用效率。

以往研究大多基于某一特定地区, 针对某个影响参数而开展的田间试验研究, 缺乏系统的综合分析, 另一方面, 灌溉的产量和水分利用效应在地区间是否差异显著, 是否因不同气候条件、不同灌溉定额条件而表现出差异, 研究间分歧的来源是什么, 很难从传统的单一小区试验中得知。因此, 须利用已有的大量田间独立试验结果, 从更大尺度进行宏观定量综合分析。

Meta 分析是一种能够对同一主题的多个研究结果进行综合分析的方法, 可以量化地综合现有试验数据, 系统分析特定措施的综合效应及其影响因素。

收稿日期: 2019-05-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01-02); 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017CXY-09); 国家外国专家局“111”计划项目(B12007)

作者简介: 武亚梅, 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: 1035990161@qq.com

通信作者: 朱德兰, 女, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: dlzhu@126.com

目前, Meta 分析方法逐渐在农业工程领域得到应用, 已被应用于分析地膜覆盖对马铃薯产量的影响^[11]、小麦玉米产量对深松的响应^[12]、可降解膜对玉米产量的影响及其影响因素^[13]、加气灌溉对作物产量和水分利用效率的影响^[14]等。本文通过文献检索获得 98 篇灌溉条件下冬小麦产量与水分利用效率的大田试验文献, 共计 953 组试验数据, 以冬小麦生育期内不灌溉为对照, 应用 Meta 分析方法定量研究灌溉冬小麦产量及水分利用效率的区域效应及影响因素, 以期为提高不同气候条件下灌溉冬小麦产量与水分利用效率提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究通过对中国知网、维普、万方及 Web of science、Google scholar 等中英文数据库进行检索, 收集了截至 2017 年 7 月 21 日国内外发表的有关灌溉对我国冬小麦产量和水分利用效率影响的田间试验论文, 中文检索词包括灌溉、冬小麦、产量、耗水、水分利用效率等及其组合; 英文检索词包括 irrigation、winter wheat、yield、water consumption、water use efficiency (WUE) 及其组合等。用于该研究的分析样本的筛选标准如下: ①试验地点位于中国范围, 试验站点明晰, 年份清楚; ②必须为无防雨棚的田间试验, 盆栽、水分池及有防雨棚的试验均排除在外; ③试验处理同时包括灌溉(试验组)与生育期不灌溉(对照组), 排除种植密度为试验因素的文献; ④文中列出 2 种处理的产量或水分利用效率的均值、标准差(误)和样本量(处理重复数), 至少有冬小麦产量和水分利用效率 2 个指标中的 1 个。经以上标准筛选, 共获得 98 篇文献(中文 86 篇, 外文 12 篇), 包含 953 组数据对(产量 953 组, 水分利用效率 592 组)。文献中的数据有 3 种呈现方式: 表格、柱状图与折线图, 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, 则采用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件^[15]进行数字化转换后再提取。对符合标准的文献提取试验点位置、生育期降雨量、年均温度、冬小麦品种、试验时间、灌溉定额、各处理的产量与水分利用效率等数据。文献缺乏气象数据时, 通过国家气象信息中心中国气象数据网获取 (<http://data.cma.cn>)。

1.2 数据分析

1.2.1 整合分析

在 OpenMEE 软件^[16]中输入各研究灌溉和不灌溉冬小麦产量和水分利用效率的均值、其对应的标准偏差、样本个数(试验重复数), 使用反应比的自然对数($\ln R$)^[17]作为效应值, 由于试验数据来自于不同试验地点, 研究方向和田间管理措施也各不相同, 选

用随机效应模型计算效应值 $\ln R$ ^[18]:

$$\ln R = \ln(X_e/X_c), \quad (1)$$

式中: X_e 和 X_c 是试验组和对照组的产量或水分利用效率的均值 (kg/hm^2 或 kg/m^3); R 为反应比。利用 OpenMEE 软件中的随机效应模型对原始数据进行整合分析, 得到平均反应比。如果 95% 置信区间与 0 相交, 可认为试验组和对照组差异不显著; 如果 95% 置信区间与 0 无交叉, 则认为差异显著^[19]。为了更加直观地反映灌溉冬小麦产量与水分利用效率效应和便于解释, 将效应值 $\ln R$ 转化为增产率或相对水分利用效率变化率 Z ^[17]:

$$Z = (R-1) \times 100\%, \quad (2)$$

式中: Z 为增产率或相对水分利用效率变化率。

若 $R=1$, 即变化率为 0, 表明试验组和对照组没有差异; 若 $R>1$, 则说明产生了正效应, 灌溉引起冬小麦产量或水分利用效率提高; 若 $R<1$, 则产生了负效应, 灌溉使得冬小麦产量或水分利用效率降低。为了直观反映各研究数据对冬小麦产量和水分利用效率指标效应值 $\ln R$ 的分布情况, 本研究利用高斯函数对冬小麦产量和水分利用效率指标的各效应值 $\ln R$ 进行正态分布拟合^[20], 计算式为:

$$y = A \times \exp \frac{-(x-x_c)^2}{2w^2}, \quad (3)$$

式中: x 是冬小麦产量或水分利用效率某一分布频数区间 $\ln R$ 的均值; y 是 $\ln R$ 在某一区间的分布频数; A 是当 $x=x_c$ 时对应的系数; x_c 和 w 分别为 $\ln R$ 频数分布所拟合正态分布曲线的平均值和方差。

1.2.2 Meta 回归分析

将原文献围绕各变量按照一定标准进行组别划分, 并对其进行 Meta 回归分析。Meta 回归可以理解多元回归, 用来分析不同自变量对因变量的影响大小^[20]。应用 OpenMEE 软件中的 Meta-Regression 模块进行 Meta 回归分析。

1.2.3 亚组分析

对不同的分组进行亚组(影响因素)分析, 同时也作为 Meta 回归分析结果稳健性的检验。

2 结果与分析

2.1 冬小麦产量与水分利用效率的区域效应

2.1.1 冬小麦产量的区域效应

收集的 98 篇文献中, 涉及山东、山西、陕西、河北、河南、新疆、北京、天津共 8 个省、市、自治区。本文根据获取数据情况及中国自然地理区域划分, 将这些数据划分到西北、华北、华中和华东 4 个主要区域, 计算各区域冬小麦产量效应值和进行高斯分布拟合(表 1)。Meta 分析结果表明, 西北、华北和华东地区冬小麦产量综合效应值分别为 $\ln R$ 为

0.246±0.038、0.396±0.030 和 0.176±0.022，这与高斯分布拟合曲线对应的 $\ln R$ 均值几乎相同（分别对应 0.215、0.210、0.126），说明拟合曲线较好地反映了冬小麦产量对灌溉的响应大小的总体分布情况；华中地区冬小麦产量综合效应值 $\ln R$ 为 0.611±0.134（表 1），这与高斯分布拟合曲线对应的 $\ln R$ 均值几乎相同（0.675），但正态检验的失败表明对数转化并不能总是能得到正态分布。

表 1 产量效应值与高斯分布拟合表

Table 1 Effect sizes ($\ln R$) and Gaussian distribution of yield in different regions

区域 Districts	效应值 Effect size $\ln R$		高斯分布 Gaussian distribution				
	平均值 Mean	95%置信区间 95% Confidence interval	A	Xc	w	R ²	P
西北 Northwest	0.246	0.038	51.101	0.215	0.216	0.941	<0.001
华北 North China	0.396	0.030	191.948	0.210	0.177	0.859	<0.001
华中 Central China	0.611	0.134	7.062	0.675	0.772	-0.068	0.128
华东 East China	0.176	0.022	106.719	0.126	0.079	0.947	<0.001

注 平均值：加权平均的效应值；参数 A、Xc 和 w 是高斯分布方程的参数，在式（3）中已经定义，下同。

Note Mean, the weighted effect sizes; Parameters A、Xc and w are defined in Equation(3). The same as below.

总体而言，与生育期不灌溉相比（表 2），灌溉冬小麦平均增产率为 39.34%（置信区间 37.01%~41.70%），在中国西北、华北、华中和华东地区，冬小麦产量效应值的 95%置信区间均不包含 0，呈现出显著的增产效应，对应增产率分别为 27.90%、47.49%、84.25%和 19.56%。

表 2 灌溉冬小麦产量的区域效应

Table 2 Effect of irrigated winter wheat yield in different regions

区域 Districts	指标 Index	变化率 Change rate/%	95%置信区间/% 95% Confidence interval		异质性检验 Heterogeneity test I ² /%
			下限 Lower limit	上限 Upper limit	
西北 Northwest	产量 Yield	27.90	23.11	32.87	96.023
华北 North China		47.49	43.22	51.89	98.615
华中 Central China		84.25	61.07	110.76	98.988
华东 East China		19.56	16.83	22.34	97.000
总体 Overall		39.34	37.01	41.70	98.343

2.1.2 冬小麦水分利用效率的区域效应

Meta 分析结果表明，西北地区灌溉冬小麦水分利用效率综合效应值 $\ln R$ 为 0.060±0.059（表 3），高斯分布拟合结果表明，对与不灌溉相比，灌溉对冬小麦水分利用效率影响明显，效应值的频数分布呈显著正态分布；华北、华中和华东地区冬小麦水分利用效率综合效应值 $\ln R$ 分别为 0.044±0.028、0.294±0.084、-0.082±0.019，这与高斯分布拟合曲线对应的 $\ln R$ 均值在数值上同样比较接近（分别为 0.026、0.326 与 -0.100），说明拟合曲线较好地反映了冬小麦水分利用效率对灌溉的响应大小的总体分布情况。

表 3 水分利用效率效应值与高斯分布拟合表

Table 3 Effect sizes ($\ln R$) and Gaussian distribution of WUE in different regions

区域 Districts	效应值 Effect size $\ln R$			高斯分布 Gaussian distribution				
	平均值 Mean	95%置信区间 95% Confidence interval/%		A	Xc	w	R ²	P
西北 Northwest	0.060	0.059		31.423	-0.059	0.131	0.635	<0.050
华北 North China	0.044	0.028		143.455	0.026	0.155	0.982	<0.001
华中 Central China	0.294	0.084		16.236	0.326	0.275	0.575	<0.050
华东 East China	-0.082	0.019		53.703	-0.100	0.113	0.861	<0.001

在中国不同区域，灌溉对冬小麦水分利用效率影响不同（表 4）。西北、华北和华中分别增加 6.21%、4.57%和 34.18%，华东地区的水分利用效率变化率为 -7.84%。可见，与生育期不灌溉相比，灌溉冬小麦的水分利用效率整体平均增加 3.39%，但在降雨量较为丰富的华东地区，与生育期内不灌溉相比，灌溉后反

而降低了冬小麦水分利用效率。

2.2 冬小麦产量与水分利用效率效应的异质性分析

Meta 分析通常采用总异质性估量综合效应值的变异程度，原研究不具有 consistency 时可进行分组后再综合^[21]。由表 2 和表 4 可看出，不同区域灌溉冬小麦产量和水分利用效率异质性检验均大于 50%，表明所纳

入的各研究间存在异质性，需要探索异质性来源。对此，将数据分别按灌溉定额、生育期降雨量、年降雨量、生育期均温分组，运用 Meta 回归分析检验研究间异质性的来源。由于年降雨量不仅包括生育期降雨量，还包含播前降雨，因此分组考虑降雨和温度 2 类气象条件对灌溉冬小麦的产量和水分利用效率效应。

异质性分析结果见表 5，各变量的回归系数表征纳入各变量后，回归模型中各变量与产量效应值和水分利用效率效应值的相关性，可以看出，各变量均不同程度地影响增产率和水分利用效率变化率，各因素解释了 7.84%的产量异质性和 5.64%的水分利用效率异质性。

表 4 灌溉冬小麦水分利用效率的区域效应

Table 4 Effect of irrigated winter wheat water use efficiency in different regions

区域 Districts	指标 Index	变化率 Change rate/%	95%置信区间 95% Confidence interval/%		异质性检验 Heterogeneity test I^2 /%
			下限 Lower limit	上限 Upper limit	
西北 Northwest	水分利用效率 Water use efficiency	6.21	0.05	12.75	97.091
华北 North		4.57	1.63	7.59	98.313
华中 Central China		34.18	23.32	46.00	98.160
华东 East China		-7.84	-9.54	-6.11	96.809
总体 Overall		3.39	1.75	5.07	98.228

表 5 灌溉冬小麦产量与水分利用效率的异质性分析

Table 5 Heterogeneity analysis of irrigated winter wheat yield and water use efficiency

指标 Index	产量 Yield	水分利用效率 WUE	指标 Index	产量 Yield	水分利用效率 WUE
	系数 Coefficient	系数 Coefficient		系数 Coefficient	系数 Coefficient
截距 Intercept	0.272***	0.052	截距 Intercept	0.447***	0.237***
灌溉定额 Irrigation volumes	0.001***	-0.001***	灌溉定额 Irrigation volumes	0.001***	-0.001***
生育期降雨量 PGP	-0.001***	-0.000***	年降雨量 AP	-0.000***	-0.000***
生育期均温 ATP	0.019***	0.015***	异质性 Heterogeneity	7.84%	5.64%
异质性 Heterogeneity	14.51%	7.89%			

注 *、**、***分别表示在 5%、1%、0.1%水平上显著。字母 PGP、ATP 和 AP 分别是 precipitation of growth period, average temperature of growth period and annual precipitation.

Note Significance of effects with $P<0.001$ is noted as ***, $P<0.01$ is noted as **, $P<0.05$ is noted as *.The letters PGP, ATP and AP are precipitation of growth period, average temperature of growth period and annual precipitation respectively.

2.3 冬小麦产量的影响因素

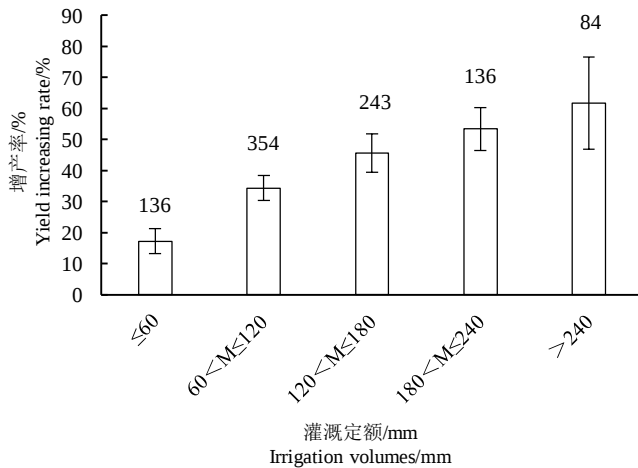
根据冬小麦产量的异质性分析结果，分别按灌溉定额、生育期降雨量、年降雨量和生育期均温分组多次进行 Meta 分析，探究灌溉条件下各影响因素对冬小麦产量的效应。以冬小麦试验年份生育期实测降雨量较多年生育期降雨量均值的相对变化率 $\leq -25\%$ 、 $-25\% \sim 25\%$ 、 $\geq 25\%$ 将生育期降雨量分为 3 组；与半干旱、干旱地区与湿润地区的划分相似^[12]，将年降雨量分为： $\leq 400\text{ mm}$ 、 $400 \sim 600\text{ mm}$ 和 $\geq 600\text{ mm}$ ，分别代表干旱、半干旱和湿润年份；生育期平均气温分为 $\leq 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $> 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

灌溉条件下冬小麦产量影响因素分析如图 1 所示，图 1 中各柱体上的线表示 95%置信区间的上下限值，字母 M 代表灌溉定额，误差线上方的数字表示相应分组数据对的数量。结果表明，灌溉冬小麦的增产效应随灌溉定额的不同表现出一定差异(图 1(a))。总体而言，各分组灌溉定额均显著提高了冬小麦产量，增产率随灌溉定额的增加而增大，增幅逐渐趋于稳定。

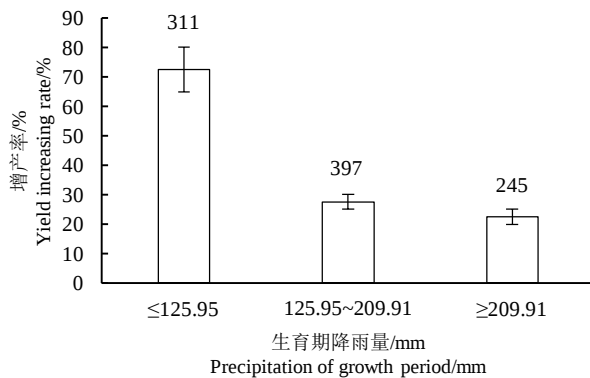
灌溉定额 $\leq 120\text{ mm}$ 时的冬小麦产量平均提高 34.39%（置信区间 30.32%~38.59%），显著高于灌溉定额 $\leq 60\text{ mm}$ 的 17.23%（置信区间 13.20%~21.40%）。与灌溉定额 $\leq 180\text{ mm}$ 相比，当灌溉定额分别增加到 $> 180\text{ mm}$ 且 $\leq 240\text{ mm}$ 、 $> 240\text{ mm}$ 时，冬小麦的增产率从 45.65%（置信区间 39.52%~52.04%）分别增加为 53.39%（置信区间 46.43%~60.68%）和 61.68%（置信区间 46.81%~78.06%），平均增产效应差异却并不显著。

灌溉冬小麦的增产效应在不同的气候条件下有所差异。总体而言，灌溉冬小麦的增产效应随生育期降雨量的增加而减小（图 1（b）），随年降雨量的增加呈现先增加后减少的趋势（图 1（c））。当冬小麦生育期内降雨量偏少时，灌溉的增产效应非常显著（平均增产率 72.48%，置信区间 64.86%~80.45%），但当生育期降雨量处于半干旱或者湿润年份时，灌溉虽显著增加了冬小麦产量，但增产率（分别为 27.56%和 22.40%）显著低于降雨偏少时，且二者差异并不

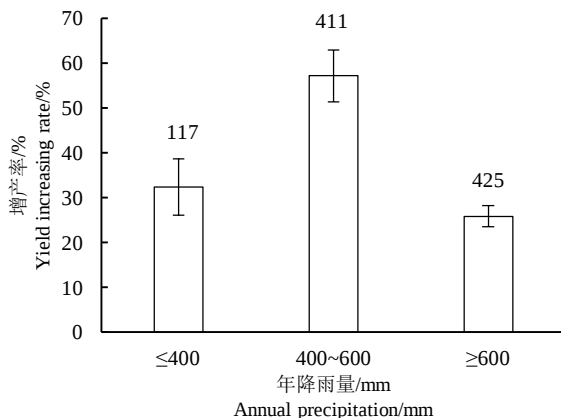
显著(置信区间 25.06%~30.11%、19.80%~25.05%); 年降雨量为 400~600 mm 时冬小麦平均增产 57.12%, 而当年降雨量 ≤ 400 mm 和 >600 mm 时, 灌溉冬小麦的增产效应均有一定幅度的降低, 增产率分别降低为 32.39%、25.83%, 但灌溉较生育期不灌溉在不同年降雨量下均不同程度地显著提高了冬小麦产量。温度也是影响冬小麦产量的一个重要气候因子。整合分析结果表明(图 1(d)), 灌溉冬小麦的产量随生育期均温的增加而显著增加, 生育期均温 ≤ 9 °C 时, 冬小麦平均增产率只有 22.09%, 当生育期均温 >9 °C 和时, 平均增产率显著提高, 达到 45.81%。



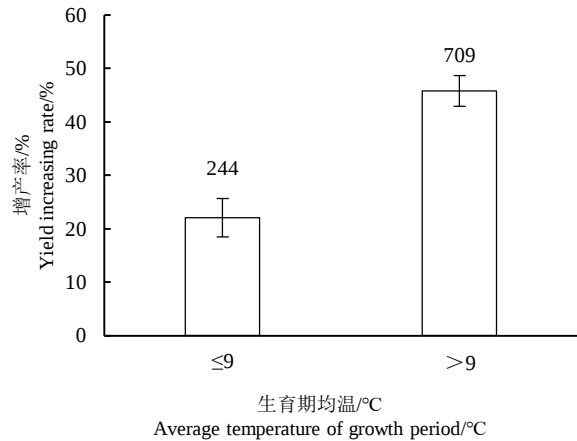
(a) 灌溉定额 (a) Irrigation volumes



(b) 生育期降雨量 (b) Precipitation of growth period



(c) 年降雨量 (c) Annual precipitation



(d) 生育期均温 (d) Average temperature of growth period

图 1 灌溉冬小麦产量影响因素分析

Fig.1 Analysis of factors affecting yield of irrigated winter wheat

2.4 冬小麦水分利用效率的影响因素

生育期灌溉与不灌溉条件下冬小麦水分利用效率影响因素分析(图 2)结果表明, 灌溉冬小麦的水分利用效率效应随灌溉定额的增加呈先增加后减少的趋势(图 2a)。灌溉定额 ≤ 60 mm 和 >120 mm 且 ≤ 180 mm 均提高了冬小麦水分利用效率, 相对水分利用效率变化率分别为 1.66%和 4.01%, 但较生育期不灌溉冬小麦水分利用效率差异不显著($P>0.05$), 且相对水分利用效率变化率在 2 个灌溉定额分组之间未达到显著性差异(置信区间-1.21%~4.62%、-0.22%~8.42%)。当灌溉定额 >180 mm 且 ≤ 240 mm 时, 冬小麦水分利用效率较生育期不灌溉略有下降(相对水分利用效率变化率-0.32%, 置信区间-5.83%~5.51%), 但差异并不显著($P>0.05$)。与灌溉定额 >180 mm 且 ≤ 240 mm 相比, 当灌溉定额增加到 >240 mm 时, 冬小麦的相对水分利用效率变化率显著降低为-11.29%(置信区间-18.57%~-3.37%), 表明增加灌溉定额降低了冬小麦的水分利用效率。与之相反, 灌溉定额 >60 mm 且 ≤ 120 mm 显著提高了冬小麦水分利用效率, 相对水分利用效率变化率为 7.66%(置信区间 4.35%~11.09%), 表明适当的灌溉定额有利于提高冬小麦的水分利用效率。

不同气候条件通过影响冬小麦耗水过程和产量, 间接影响冬小麦的水分利用效率, 产量在很大程度上决定了水分利用效率。整合分析(图 2(b)), 灌溉冬小麦在不同生育期降雨量下冬小麦水分利用效率效应表现出和产量相同的变化趋势, 即随着生育期降雨量的增加, 相对水分利用效率变化率逐渐降低, 由相对水分利用效率变化率为 14.07%的正效应逐渐降低为相对水分利用效率变化率为-2.28%的负效应, 而当生育期降雨量处于半干旱年份时, 灌溉冬小麦水分

利用效率表现出了一定的正效应，水分利用效率变化率为 0.78%，但差异同全生育期不灌溉时的水分利用效率并不显著（置信区间-1.42%~3.04%）在不同年降雨量条件下（图 2（c）），灌溉冬小麦水分利用效率效应表现出与产量相似的趋势，即随着年降雨量的增加，相对水分利用效率变化率呈先增加后减少的趋势。在干旱和湿润年份，灌溉对冬小麦水分利用效率的效应较生育期不灌溉均不显著（置信区间-5.96%~7.93%、-0.15%~3.77%），而半干旱年份灌溉后，冬小麦水分利用效率随产量的显著增加而增加，较生育期不灌溉显著提高水分利用效率 6.22%（置信区间 2.70%~9.86%）。此外，温度同样是影响冬小麦水分利用效率的一个气象因子^[8, 22]。如图 2（d）所示，生育期均温 $\leq 9^{\circ}\text{C}$ 时，灌溉冬小麦水分利用效率较生育期不灌溉总体有所降低（相对水分利用效率变化率-1.70%），但差异同生育期不灌溉时的水分利用效率并不显著（置信区间-5.32%~2.04%）；生育期均温 $> 9^{\circ}\text{C}$ 时，灌溉冬小麦水分利用效率显著提高（相对水分利用效率变化率 5.38%，置信区间 3.46%~7.35%）。

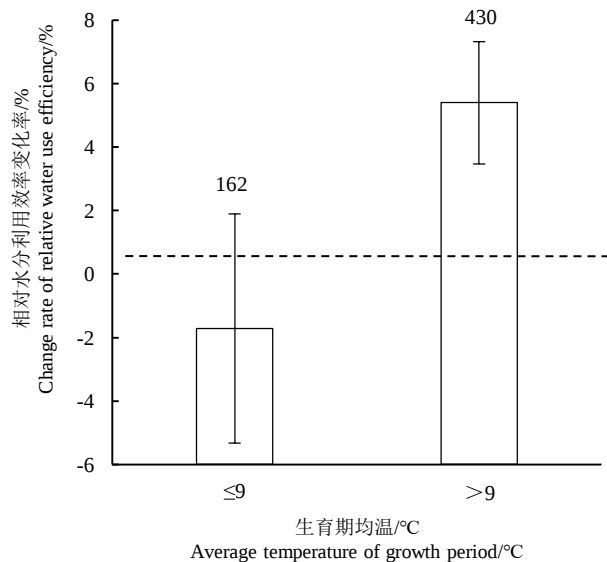
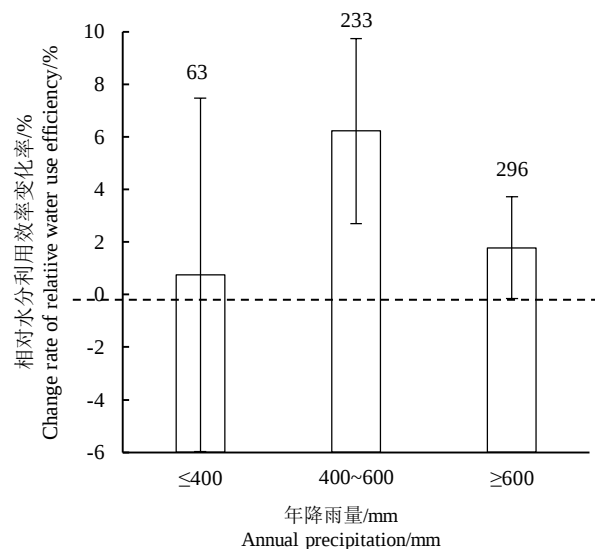
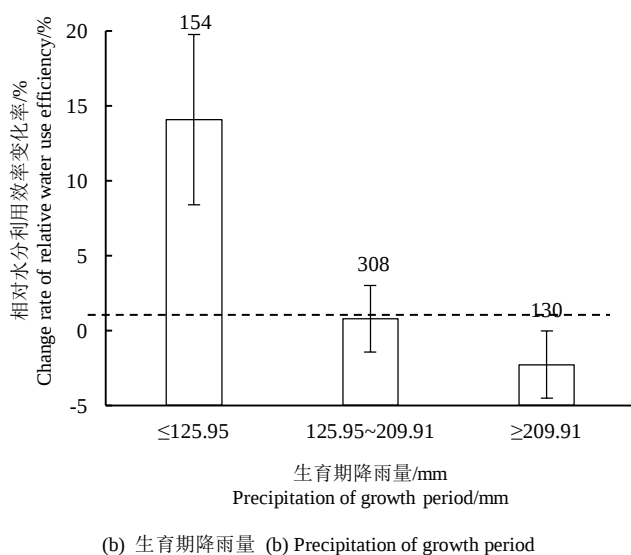
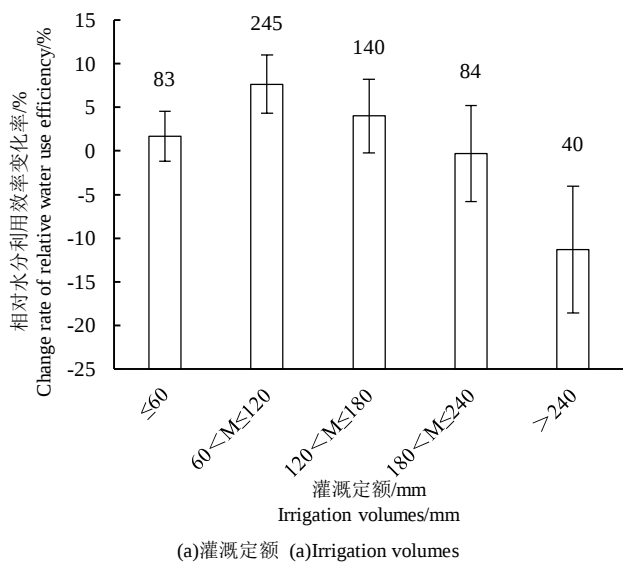


图 2 灌溉冬小麦水分利用效率影响因素分析

Fig.2 Analysis of factors affecting water use efficiency of irrigated winter wheat

3 讨论

根据全国小麦种植区域分布的统计结果来看，本论文的研究区域所在省份播种面积占全国的 58%^[23]，包含了主要冬小麦种植省份如河北、陕西、山东等，能够在一定程度上代表中国北方冬小麦生产区域的状况。本研究将代表西北、华中、华东、华北的 953 组数据用于 Meta 分析，单纯说明这些区域的研究较多，且能够符合 Meta 数据分析的要求，并不表明在其他地方没有冬小麦产量和水分利用效率影响因素的研究存在。如王艺陶^[24]在沈阳市开展了不同生育时期进行灌水处理的冬小麦试验，但未报道各处理灌溉定额，难以明确灌溉定额对冬小麦产量的影响，故不包含在本研究内。

同一地区,影响作物产量的主要气象因子在不同生育期表现出一定差异^[3, 25],不同地区,对同一生育阶段而言,影响作物产量的主要气象因子也不尽相同^[26]。本文基于多样本大尺度研究发现,冬小麦增产率随生育期均温和年均气温的增加而增大,这与张耀耀等^[22]的研究结论不一致。本研究从较大的空间尺度上得出灌溉条件下年平均气温对灌溉冬小麦产量有显著的正效应,而张耀耀等研究表明沧州地区冬小麦实际水肥条件下的可获得产量与平均气温相关性不大,空间尺度不同可能是造成结果不一致的原因。另外,由于纳入的文献中温度较高的数据较多,数据的不平衡性可能造成结果产生一定的偏倚。本研究表明生育期降雨量较少时,灌溉显著提高了冬小麦水分利用效率,这与杨文稼等^[10]的研究结果一致。肖国举等^[27]研究发现,春小麦水分利用效率随灌溉量的增加而减小,与本文灌溉条件下灌溉定额对冬小麦水分利用效率的效应分析一致,表明适量的灌溉可以达到高产和节水的有效统一。

本研究应用 Meta 分析方法对灌溉冬小麦产量和水分利用效率效应及影响因素进行了初步整合和定量分析,一定程度上可反映灌溉冬小麦产量和水分利用效率的影响机制,但也存在局限性。灌溉增产效应受多个因素的影响,这些因素之间可能存在交互作用,本研究只针对数据较多的影响因素进行分析,而其他一些影响因子,如覆膜、耕作方式、土壤类型和灌溉方式等,本论文没有涉及。

4 结 论

1) 与生育期不灌溉相比,灌溉后冬小麦平均增产率为 39.34%,西北地区为 27.90%,华北地区 47.49%,华中地区 84.25%,华东地区 19.56%;冬小麦平均相对水分利用效率变化率为 3.39%,各地域分别为 6.21%、4.57%、34.18%和-7.84%。

2) 灌溉冬小麦的产量受灌溉定额、降雨和温度的影响,与生育期不灌溉相比,表现为增产率随灌溉定额的增大而增大,但增加趋势逐渐趋于平稳;生育期降雨量小于 125.95 mm 时灌溉增产率可高达 72.48%;增产率随生育期均温的增大而增大。

3) 灌溉定额、降雨和温度均不同程度地影响着灌溉冬小麦的水分利用效率。灌溉定额>240 mm 时显著降低了冬小麦水分利用效率;生育期降雨量较少时灌溉显著提高了冬小麦水分利用效率;灌溉冬小麦的水分利用效率效应随生育期均温的增大而增大。

参考文献:

- [1] 辛琪,林少喆,王妮娜,等. 间隔交替波涌灌溉对冬小麦土壤水分与水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 21-25.

- XIN Qi, LIN Shaozhe, WANG Nina, et al. Effect of alternate surge flow irrigation on soil moisture and water use efficiency of winter wheat field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 21-25.
- [2] 代立芹,李春强,魏瑞江,等. 河北省冬小麦生长和产量对气候变化的响应[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 294-300.
- DAI Liqin, LI Chunqiang, WEI Ruijiang, et al. Response of Growth and Yield of Winter Wheat to Climate Change in Hebei Province[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 294-300.
- [3] 范磊,胡海燕,王来刚,等. 基于农户数据的河南中东部地区气象因子对冬小麦产量的影响分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1): 109-113.
- FAN Lei, HU Haiyan, WANG Laigang, et al. Impact of meteorological factors on winter wheat yield in middle and east Henan Province based on household data[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(1): 109-113.
- [4] 宜丽宏,王丽,张孟妮等. 不同灌溉方式对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 14-19.
- YI Lihong, WANG Li, ZHANG Mengni, et al. Effect of Irrigation Methods on Growth and Water Use Efficiency of Winter Wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(10): 14-19.
- [5] 周丽丽,薛彬,孟范玉,等. 喷灌定额和灌水频次对冬小麦产量及品质的影响分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 235-243.
- ZHOU Lili, XUE Bin, MENG Fanyu, et al. Effects of irrigation quota and irrigation frequency on yield and quality of winter wheat under sprinkler irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 235-243.
- [6] 张力,张保华. 冬小麦气象产量分析[J]. 中国农业气象, 2004, 25(1): 22-24.
- ZHANG Li, ZHANG Baohua. Analysis of meteorological yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 25(1): 22-24.
- [7] 王春玲,申双和,王润元,等. 气象条件对冬小麦生长发育和产量影响的研究进展[J]. 气象科技进展, 2012, 2(6): 60-62.
- WANG Chunling, SHEN Shuanghe, WANG Runyuan, et al. Review of effects of weather conditions on winter wheat growth, cultivation and production[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(6): 60-62.
- [8] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等. 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生育及水分利用效率的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2 290-2 297.
- YAO Yubi, WANG Ruiyuan, YANG Jinhu, et al. Impacts of climatic change on the growth and water use efficiency of winter wheat in the semi-humid region of Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(11): 2 290-2 297.
- [9] 房全孝,陈雨海,李全起,等. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34-39.
- FANG Quanxiao, CHEN Yuhai, LI Quanqi, et al. Effect of irrigation on water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese

- Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4): 34-39.
- [10] 杨文稼, 王仕稳, 李雨霖, 等. 半干旱地区补充灌溉对冬小麦根系及耗水特征的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 920-928.
YANG Wenjia, WANG Shiwen, LI Yulin, et al. Effects of supplementary irrigation on root system and water consumption of winter wheat in semiarid region[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 920-928.
- [11] 赵爱琴, 魏秀菊, 朱明. 基于 Meta-analysis 的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 1-7.
ZHAO Aiqin, WEI Xiuju, ZHU Ming. Meta analysis on impact of plastic film on potato yield in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 1-7.
- [12] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7-15.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 7-15.
- [13] 银敏华, 李援农, 申胜龙, 等. 中国可降解膜覆盖对玉米产量效应的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 1-9.
YIN Minhua, LI Yuannong, SHEN Shenglong, et al. Meta-analysis on effect of degradable film mulching on maize yield in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19): 1-9.
- [14] DU Yadan, NIU Wenquan, GU Xiaobo, et al. Crop yield and water use efficiency under aerated irrigation: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2018, 210: 158-164.
- [15] ROMERO-OLIVARES A L, ALLISON S D, TRESEDER K K. Soil microbes and their response to experimental warming over time: A meta-analysis of field studies[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 107: 32-40.
- [16] ADU M O, YAWSON D O, ARMAH F A, et al. Meta-analysis of crop yields of full, deficit, and partial root-zone drying irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 197: 79-90.
- [17] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [18] M B, V H L, T H J P. Introduction to Meta-Analysis[M]. Hoboken :John Wiley & Sons, 2009.
- [19] MORGAN P B, AINSWORTH E A, LONG S P. How does elevated ozone impact soybean A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield[J]. Plant Cell and Environment, 2003, 26(8): 1317-1328.
- [20] 赵鑫. 基于 Meta-analysis 对我国保护性耕作农田土壤固碳减排效应及其潜力的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
ZHAO Xin. Effects and Potential of Conservation Tillage on Soil Carbon Sequestration and Greenhouse Gases Emission Reduction in China Based on Meta-analysis[D]. Beijing: China Agriculture University, 2017.
- [21] 郭明, 李新. Meta 分析及其在生态环境领域研究中的应用[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 911-919.
GUO Ming, LI Xin. Meta-analysis: A new quantitative research approach in eco-environmental sciences[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5): 911-919.
- [22] 张耀耀, 刘建刚, 谷中颖, 等. 气候变化对沧州地区冬小麦产量潜力的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 31-37.
ZHANG Yaoyao, LIU Jiangang, GU Zhongying, et al. Impact of climate change on potential yield of winter wheat in Cangzhou area[J]. Journal of China Agriculture University, 2014, 19(4): 31-37.
- [23] 全国小麦种植区域分布[Z]. [EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/cb565b4cf7ec4afe04ald96.html>.
Regional distribution of wheat planting in China[Z]. [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/cb565b4cf7ec4afe04ald96.html>.
- [24] 王艺陶, 莹莹, 章建新, 等. 不同灌水处理对冬小麦冠层结构及光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 63-66.
WANG Yitao, YI Ying, ZHANG Jianxin, et al. Effects of irrigation on winter wheat photosynthetic character and canopy structure[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 63-66.
- [25] 普宗朝, 张山清, 宾建华, 等. 气候变化对乌鲁木齐市冬小麦产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 115-123.
PU Zongchao, ZHANG Shanqing, BIN Jianhua, et al. Impact of climate change on winter wheat yield in Urumqi, Xinjiang[J]. Journal of Northwest A & F University(Social Science Edition), 2013, 41(3): 115-123.
- [26] 邱新法, 曾燕. 影响我国冬小麦产量的气象因子研究[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(4): 575-578.
QIU Xinfa, ZENG Yan. Primary meteorological factors affecting winter wheat yield in China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2000, 23(4): 575-578.
- [27] XIAO Guojun, LIU Weixiang, XU Qiang, et al. Effects of temperature increase and elevated CO₂ concentration, with supplemental irrigation, on the yield of rain-fed spring wheat in a semiarid region of China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3): 243-255.

Meta-analysis on Influencing Factors of Irrigated Winter Wheat Yield and Water Use Efficiency in China

WU Yamei^{1, 2}, ZHU Jintin³, ZHU Delan^{1, 2*}, LI Dan^{1, 2}

(1.Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A& F University, Yangling 712100, China; 3.Qinghai Research Institute of Water Conservancy & Hydro-electric Power, Xining 810001, China)

Abstract: 【Objective】 At present, most of the studies on the factors affecting the yield and water use efficiency of irrigated winter wheat are concentrated on a particular area, and the study are scattered. Considering these, this paper reveals the influencing factors of yield and water use efficiency of irrigated winter wheat at macro scale. 【Method】 Based on the published data of field experiments, we obtained the effects of irrigation on yield and water use in different areas by using Meta-analysis method. On the basis of heterogeneity test, the effects of irrigation quota, rainfall and average temperature on winter wheat yield and water use efficiency were investigated by meta subgroup analysis. 【Result】 Compared with non-irrigated winter wheat during the growth period, irrigation increased winter wheat yield by 39.34% and water use efficiency by 3.39%. The yield increased with the irrigation quota, and the increase tended to stabilize gradually, while the effect of water use efficiency increased first and then decreased with the irrigation quota. When the irrigation quota was increased to >240 mm, the change rate of relative water use efficiency (*WUE*) of winter wheat decreased by 11.29%. With the increase of average temperature during the growth period, the yield-increasing effect of irrigated winter wheat was significant. The yield of winter wheat increased by 45.81% when the average temperature of the growing period was higher than 9°C . The rainfall in the growth period had a significant effect on the yield of irrigated winter wheat, and the effect of irrigation yield was the most prominent when the rainfall type in the growth period was dry year with yield increase rate of 72.48%. 【Conclusion】 The irrigation quota of 60~120 mm is more favorable to increase yield and water use efficiency of winter wheat. The study results can be used as reference for timely and appropriate field irrigation for different rainfall years.

Key words: winter wheat; yield; water use efficiency; Meta-analysis; irrigation quota; meteorological factor

责任编辑: 赵宇龙