

基于 Meta-Analysis 方法分析滴灌对玉米水分 利用效率及产量的影响

黄悦¹ 李思恩^{1*} 胡丹² 丛雪² 张若晴

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 上海交通大学 自然科学研究院, 上海 200240)

摘要 为探究灌溉方式、灌溉水平和品种对玉米水分利用效率及产量的定量影响,基于中国知网及 Web of Science,以“玉米”、“滴灌”、“水分利用效率/产量”等为主题检索词,检索到 2000-01-01—2020-12-31 发表的 110 篇文献,并根据已定筛选标准,最终纳入 21 篇文献的 94 组相关数据进行 Meta-Analysis。结果表明:1)以灌溉量为 40%~60% 的作物需水量(ET_c)为对照,与 60%~80%、100%~120% 和 120%~140% 的 ET_c 相比,灌溉量为 80%~100% ET_c 时,玉米水分利用效率的效应值最高,标准均值差 $SMD=2.83(P<0.05)$,产量的效应值也较高, $SMD=1.70(P>0.05)$;2)灌溉量在 80%~100% ET_c 的水平下,以滴灌为对照,畦灌、沟灌和漫灌的玉米水分利用效率的合并效应值 $SMD=-4.55(P<0.05)$,产量的合并效应值 $SMD=-1.34(P<0.05)$;3)灌溉量在 80%~100% ET_c 的水平下,以‘郑单 958’为对照,与‘西蒙 6 号’、‘沈单 10 号’、‘秋乐 126’和‘农华 101’相比,种植‘京科 958’的玉米水分利用效率的效应值最高, $SMD=4.53(P<0.05)$,产量的效应值也最高, $SMD=6.70(P<0.05)$ 。因此,建议在灌溉区域采用滴灌灌溉方式,能够增产节水。水分利用效率能提高 45.5%,产量能提高 13.4%。同时使滴灌水平控制在 80%~100% ET_c 下,节水增产的效果更优。

关键词 Meta-Analysis; 玉米; 水分利用效率; 产量

中图分类号 S507.1

文章编号 1007-4333(2022)05-0096-10

文献标志码 A

Effects of drip irrigation on water use efficiency and yield of maize based on Meta-Analysis

HUANG Yue¹, LI Sien^{1*}, HU Dan², CONG Xue², ZHANG Ruoqing¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Natural Sciences, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract To investigate the quantitative effects of irrigation methods, irrigation levels and crop varieties on the water use efficiency and yield of maize in China, 110 papers published from 2000-01-01 to 2020-12-31 were retrieved by using “maize”, “drip irrigation” and “water use efficiency/yield” as subject search terms on CNKI and Web of Science. According to the established screening criteria, 94 groups of relevant data from 21 papers were included for Meta-Analysis. The results showed that: 1) Using 40% - 60% ET_c (crop water requirement) as control, compared with 60%-80% ET_c , 100% - 120% ET_c and 120% - 140% ET_c , the irrigation amount of 80% - 100% ET_c had the highest effect value of water use efficiency with $SMD=2.83(P<0.05)$. The effect value of yield was also higher with $SMD=1.70(P>0.05)$. 2) Under 80% - 100% ET_c , using drip irrigation as control, the combined effect of water use efficiency under border irrigation, furrow irrigation and flood irrigation was $SMD=-4.55(P<0.05)$, and the combined effect of yield was $SMD=-1.34(P<0.05)$. 3) Under 80% - 100% ET_c and using ‘Zhengdan 958’ as

收稿日期: 2021-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879262)

第一作者: 黄悦, 硕士研究生, E-mail: 2251938562@qq.com

通讯作者: 李思恩, 教授, 主要从事农田节水减排与水热碳氮循环研究, E-mail: lisien@cau.edu.cn

control, compared with ‘Ximeng 6’, ‘Shendan 10’, ‘Qiule 126’ and ‘Nonghua 101’, ‘Jingke 958’ had the highest effect value of water use efficiency with $SMD = 4.53$ ($P < 0.05$). The effect value of yield was also the highest with $SMD = 6.70$ ($P < 0.05$). Therefore, application of drip irrigation in the irrigation areas can increase production and save water. The water use efficiency (WUE) and yield increased by 45.5% and 13.4%, respectively. At the same time, when the drip irrigation level is controlled at 80% – 100% ET_c , the effect of water-saving and yield increase is better.

Keywords Meta-Analysis, maize, water use efficiency, yield

玉米是全球产量最高的粮食作物,在保障国家粮食安全中具有重要地位^[1]。玉米不仅是主要粮食作物,在畜牧业、化工、燃料和医药等行业中也举足轻重^[2]。玉米是耗水量较大的作物,因此,在保障玉米产量的同时研究玉米的节水增效十分必要。传统的漫灌方式不仅会导致土壤盐碱化,破坏土壤结构,并且浪费水资源,因此,已有不少有关玉米节水增效灌溉方式的研究,如:漆栋良等^[3]研究表明在交替隔沟灌溉下采用亏水处理,可以提高制种玉米的水分利用效率,同时产量没有显著降低;徐明明等^[4]分析了覆盖滴灌模式在华北地区的节水增产效应,认为在华北地区充分滴灌下利用白膜覆盖,能够显著提高春玉米产量和水分利用效率;赵雁群等^[5]制定了畦田玉米的灌溉规格、技术参数和农田管理措施;王丽华^[6]分析了节水灌溉技术在制种玉米上的应用研究;孙仕军等^[7]研究发现更适宜的滴灌布置形式,即浅埋滴灌在辽西等半干旱地区对春玉米的节水、增产、增效效果最优;潘家荣等^[8]研究了华北平原冬小麦/夏玉米轮作区水肥高投入的特点,并实施了施氮节水灌溉技术,优化节水灌溉的同时提高了氮肥的利用率。以上结果都是研究特定区域玉米生产灌溉模式。除了灌溉方式,灌水量也是影响玉米节水增产的关键因素。戴嘉璐等^[9]探究了不同灌水和施肥条件对河套灌区不同生育期玉米生长的影响。此外,品种间的差异性也不容忽视。杨涛等^[10]利用盆栽试验研究了不同玉米品种间水分利用效率的差异。

Meta-Analysis 是一种对同一主题下的众多独立试验结果进行综合分析的统计方法^[11]。该方法是一种量化的分析,基于已有研究的基础上,利用公开发表的研究数据,经过规范化的统计分析方法,计算出试验数据效应值,并分析不同试验间的差异性^[12],发现潜在规律,得出更具一般性、代表性的科学结论的方法^[13]。20世纪90年代 Meta-Analysis 方法被引入到生态学领域^[14]。郑侃等^[15]搜集了中国北方地区有关深耕试验的65篇文献,综合分析了深耕耕作的效果,结果显示在东北、西北和

华北地区,深松耕作均能提高玉米和小麦的作物产量,深松增产没有受到所在区域的影响;毛晋花等^[16]搜集整理了国内外63篇论文的原始数据资料进行 Meta 分析,定量评估氮沉降对植物生物量分配的影响,结果显示短期氮沉降会使植物分配更多生物量给地上部分;王文立等^[17]等研究表明模拟增温提高了土壤微生物碳、土壤微生物氮和土壤真菌量,土壤细菌量在模拟增温后则有降低趋势。

Meta-Analysis 在国内农业研究领域得到广泛应用,但是有关灌溉模式与灌溉量等条件对于玉米水分利用效率与产量的综合定量关系的研究尚未见报道。因此,为系统分析灌溉量、灌溉方式等因素对玉米水分利用效率及产量影响,本研究以中国知网及 Web of Science 为工具,检索有关中国玉米灌溉方面的相关文献报道,并利用 Meta-Analysis 方法分析筛选确定文献发表的试验数据,以期为大田作物节水增产的灌溉模式研究提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

基于中国知网及 Web of Science,以“玉米”、“滴灌”、“水分利用效率/产量”等为主题检索词,检索 2000-01-01—2020-12-31 发表的中国滴灌玉米水分利用效果及产量的相关研究。

经上述检索方法共检索到 110 篇文献,由于各大田试验的试验目的、设计与管理情况不尽相同,因此需要制定统一标准对检索到的文献进行筛选,以保证后续数据分析结果的可靠性。筛选标准为:1)研究区域地理位置 $35^{\circ} \sim 45^{\circ} N$, $100^{\circ} \sim 125^{\circ} E$; 2)试验要有对照处理,即试验需同时包含滴灌与非滴灌的对比处理或滴灌条件下不同滴灌量水平的处理;3)文献中明确指出了玉米相关处理的水分利用效率及产量的均值、标准差及重复次数(≥ 2),或者可通过文字描述、图表得到均值及标准差;4)试验设计、气象数据、土壤数据与田间管理措施等基本信息明确详细;5)剔除包含其他试验处理因素(施氮、滴

灌次数等)的文献;6)剔除试验内容重复或相近的文献。经过上述标准对文献进行筛选,最终确定21篇文献。

1.2 Meta-Analysis 方法

Meta-Analysis 是对若干独立研究的统计结果进行综合分析的统计方法。其主要步骤有:1)提出所要解决的问题并制定搜集文献的标准;2)搜集文献;3)提取、整理、分析数据;4)根据所提问题分析所得结果^[13]。目前主要利用软件开展 Meta-Analysis 研究,软件包括:Metawin、Review Manager、OppenMME、Stata 和 R,R 语言中的 Meta 软件包功能强大,作图方便清晰,是 Meta-Analysis 的有力工具,故本研究利用 R 语言进行 Meta-Analysis 研究。

效应值是 Meta-Analysis 的重要参数,Meta-Analysis 通过比较效应值大小分析数据的规律,简洁直观,便于统一比较^[18]。在农业领域,效应值大多采用标准均值差(SMD),采用 SMD 可以消除不同研究间由于测量单位不同造成的影响,也可消除研究中多个亚组间绝对值的差异^[19]。此外本研究的试验数据多为平均值、标准差和样本数,采用 SMD 作为效应值较为合理。

$$SMD = (X_t - X_c)J/S \quad (1)$$

$$S = \sqrt{[(N_t - 1)S_t^2 + (N_c - 1)S_c^2]/(N_t + N_c - 2)} \quad (2)$$

$$J = 1 - 3/[4(N_t - N_c - 2) - 1] \quad (3)$$

式中: X_t 、 X_c 分别为试验组和对照组的平均值; J 为取样误差的修正系数; N_t 、 N_c 分别为试验组和对照组的样本数; S_t 、 S_c 分别为试验组和对照组的标准差。

累计效应值的计算涉及到模型的选择,累计效应值的模型分为固定效应模型和随机效应模型。固定效应模型只考虑效应值在组内的变异,忽视组间的变异,认为不同的研究案例间无差异。随机效应模型不仅考虑效应值在组内的变异,还考虑组间的变异。对于本研究来说,各个大田试验间的差异性不可忽视,因此选用随机效应模型^[20]。

由于纳入同一个 Meta-Analysis 的所有研究之间存在或多或少的差异,因此还要对 Meta-Analysis 结果进行异质性检验。本研究可在 R 语言中直接输入代码进行异质性检验。统计量 I^2 能够体现真实异质性在效应值总体的变异中占的比重,且不会受到样本数量的影响,大多研究都采用 I^2 进行异质性检验。当 $25\% < I^2 \leq 50\%$,表明结果有低度的异质性;当 $50\% < I^2 \leq 75\%$,表明结果有中度的异质性;当 $I^2 > 75\%$,表明结果有高度的异质性,此时异质性不可忽视^[21]。

2 结果与分析

2.1 灌溉水平对玉米水分利用效率及产量的影响

经过前期一系列的文献检索、筛选与整理工作,共有 94 组数据纳入本研究的 Meta-Analysis,结果如表 1 所示。本研究按照不同灌溉水平共分为 5 组,因不同地区的气候、土壤等条件略有不同,单纯按灌溉量进行分组会对结果造成一定差异,故将灌溉量等效为作物需水量的百分比进行分组分析,即灌溉量分别为:120%~140%的作物需水量(ET_c)、100%~120% ET_c 、80%~100% ET_c 、60%~80% ET_c 和 40%~60% ET_c 。

表 1 不同滴灌水平下玉米水分利用效率及产量

Table 1 Water use efficiency and yield of maize under different drip irrigation levels

作物需水量/ ET_c	样本数 Sample size	水分利用效率/(kg/m^3)		产量/(kg/hm^2)	
		Water use efficiency		Yield	
		均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD
120~140	18	3.33	0.24	11 887.30	756.37
100~120	25	3.39	0.26	12 689.52	910.19
80~100	24	3.77	0.32	13 013.82	1 244.06
60~80	21	2.96	0.36	11 505.17	1 532.63
40~60	6	2.76	0.45	10 537.02	2 026.21

根据分组后初步处理得到的数据,利用 R 语言中的 Meta 软件包进行处理分析,以 40%~60% ET_c 的灌溉水平为对照组,120%~140% ET_c、100%~120% ET_c、80%~100% ET_c 和 60%~

80% ET_c 的灌溉水平为处理组,对比分析不同灌溉量水平对玉米的水分利用效率及产量的影响,得到不同滴灌水平下玉米水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 分析结果(表 2)。

表 2 不同滴灌水平下玉米水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 分析结果

Table 2 Meta-Analysis of water use efficiency and yield of maize under different drip irrigation levels

项目 Item	处理组作物需水量/% Treatment ET _c	对照组作物需水量/% Control ET _c	效应值 SMD	95%置信区间 95%-CI	权重/% Weight
水分利用效率 Water use efficiency	120~140	40~60	1.83	[0.75,2.91]	20.6
	100~120	40~60	2.04	[0.99,3.08]	25.2
	80~100	40~60	2.83	[1.65,4.01]	23.3
	60~80	40~60	0.51	[-0.41,1.43]	26.9
合并 Merge			1.76	[0.78,2.74]	100.0
产量 Yield	120~140	40~60	1.11	[0.13,2.10]	24.8
	100~120	40~60	1.78	[0.77,2.78]	23.9
	80~100	40~60	1.70	[0.70,2.71]	24.0
	60~80	40~60	0.57	[-0.35,1.49]	27.4
合并 Merge			1.26	[0.70,1.83]	100.0

本研究中 95%-CI 置信区间在坐标轴同一侧,未与纵轴相交,表明 Meta-Analysis 合并有统计学意义。由表 2 可知,不同灌溉水平的处理组与对照组进行比较,处理组水分利用效率的合并效应值 SMD=1.76,正值表示正效应,说明处理组的水分利用效率要高于对照组的水分利用效率,并且随着灌溉水平的降低水分利用效率先增大后减小,灌溉水平在 80%~100% 的 ET_c 时水分利用效率(WUE)的效应值达到最大;处理组产量的合并效应值 SMD=1.26,说明处理组的产量要高于对照组的产量,但是 $P=0.26(>0.05)$,表明不同灌溉水平处理间玉米产量差异不显著。

对不同灌溉水平下水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 进行异质性检验,水分利用效率的异质性检验结果为 $I^2=71\%(50\%<71\%<75\%)$,表明研究有中度的异质性;产量的异质性检验结果为 $I^2=25\%$,表明研究有低度的异质性。

2.2 灌溉方式对玉米水分利用效率及产量的影响

由 2.1 节可知,在 80%~100% ET_c 的灌溉水平下玉米的水分利用效率最高,产量也较高。在以往分析不同灌溉方式对玉米水分利用效率及产量的

研究中,不同的灌溉方式下其灌溉水平不尽相同,因此为探究在 80%~100% ET_c 的灌溉水平下滴灌方式对玉米水分利用效率及产量的影响是否优于其他灌溉方式,对选定的文献进一步整理筛选,共有 24 组数据,结果如表 3 所示。按照不同灌溉方式进行分组,共分为 4 组:畦灌、沟灌、漫灌和滴灌。

以 80%~100% ET_c 灌溉水平下的滴灌处理为对照组,80%~100% ET_c 灌溉水平下的畦灌、沟灌和漫灌处理为处理组,对比分析 80%~100% ET_c 灌溉水平下不同灌溉方式对玉米的水分利用效率及产量的影响,得到不同灌溉方式下玉米水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 分析结果(表 4)。由表 4 可知,不同灌溉方式的试验组水分利用效率的合并效应值 SMD=-4.55,说明畦灌、沟灌和漫灌的水分利用效率效应值要低于滴灌处理的水分利用效率效应值。表 4 中处理组产量的合并效应值 SMD=-1.34,说明畦灌、沟灌和漫灌的产量效应值要低于滴灌处理的产量效应值,且采用漫灌方式所产生的水分利用效率及产量的效应值最低。

对不同灌溉方式下水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 分析进行异质性检验,水分利用效率

的异质性检验结果为 $I^2 = 71\%$ ($50\% < 72\% < 75\%$), 表明研究有中度的异质性; 产量的异质性检验结果为 $I^2 = 59\%$ ($50\% < 59\% < 75\%$), 表明研究有中度的异质性。

表3 不同灌溉方式下玉米水分利用效率及产量

Table 3 Water use efficiency and yield of maize under different irrigation methods

灌溉方式 Irrigation method	样本数 Sample size	水分利用效率/(kg/m ³) Water use efficiency		产量/(kg/hm ²) Yield	
		均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD
		畦灌 Border irrigation	6	1.83	0.28
沟灌 Furrow irrigation	3	2.45	0.29	11 495.19	1 149.52
漫灌 Flooding	3	1.64	0.16	11 768.57	1 176.86
滴灌 Drip irrigation	12	3.04	0.20	13 284.42	676.69

表4 不同灌溉方式下玉米水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 分析结果

Table 4 Meta-Analysis of water use efficiency and yield of maize under different irrigation methods

项目 Item	处理组灌溉方式 Treatment irrigation method	对照组灌溉方式 Control irrigation method	效应值 SMD	95%置信区间 95%-CI	权重/% Weight
水分利用效率 Water use efficiency	畦灌 Border irrigation	滴灌 Drip irrigation	-5.05	[-7.16, -2.94]	34.8
	沟灌 Furrow irrigation	滴灌 Drip irrigation	-2.57	[-4.22, -0.91]	38.8
	漫灌 Flooding	滴灌 Drip irrigation	-6.78	[-9.87, -3.68]	26.5
合并 Merge			-4.55	[-6.93, -2.16]	100.0
产量 Yield	畦灌 Border irrigation	滴灌 Drip irrigation	-0.37	[-1.36, 0.62]	40.8
	沟灌 Furrow irrigation	滴灌 Drip irrigation	-2.19	[-3.75, -0.63]	28.9
	漫灌 Flooding	滴灌 Drip irrigation	-1.84	[-3.32, -0.36]	30.4
合并 Merge			-1.34	[-2.54, -0.14]	100.0

2.3 品种对玉米水分利用效率及产量的影响

根据本研究文献纳入的标准来看, 在其他标准相近的条件下, 品种的差异对玉米水分利用效率及产量的影响也不容忽视。为探究品种对玉米水分利用效率及产量的影响, 并对比不同品种与灌溉方式

对玉米水分利用效率及产量的影响大小, 进行了如下分析。由2.1节可知, 在80%~100% ET_c灌溉水平下玉米的水分利用效率最高, 产量也较高。因此, 对纳入的文献进一步整理分析, 探究在80%~100% ET_c灌溉水平下不同品种对玉米水分利用效

率与产量的影响。共有 24 组数据纳入本节研究的 Meta-Analysis, 如表 5 所示。按照不同玉米品种进

行分组, 共分为 6 组: ‘西蒙 6 号’、‘沈单 10 号’、‘秋乐 126’、‘农华 101’、‘京科 958’和‘郑单 958’。

表 5 不同品种玉米水分利用效率及产量

Table 5 Water use efficiency and yield of maize under different maize varieties

品种 Variety	样本数 Sample size	水分利用效率/(kg/m ³) Water use efficiency		产量/(kg/hm ²) Yield	
		均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD
		西蒙 6 Ximeng 6	7	3.34	0.34
沈单 10 Shendan 10	3	3.32	0.27	14 224.50	804.63
秋乐 126 Qiule 126	4	3.49	0.35	11 499.42	1 149.94
农华 101 Nonghua 101	2	1.61	0.16	14 135.00	110.00
京科 958 Jingke 958	2	3.97	0.33	18 918.40	392.89
郑单 958 Zhengdan 958	6	2.67	0.23	11 670.27	1 015.81

以 80%~100% ET_c 的灌溉水平下‘郑单 958’品种为对照组, 80%~100% ET_c 灌溉水平下的‘西蒙 6 号’、‘沈单 10 号’、‘秋乐 126’、‘农华 101’和‘京科 958’品种为处理组, 对比分析 80%~100% ET_c 灌溉水平下不同品种对玉米的水分利用效率及产量的影响, 得到不同品种玉米水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 分析结果(表 6)。可知: 品种处理组水分利用效率的合并效应值 SMD=1.84, 表 6 中处理组产量的合并效应值 SMD=1.69, 说明处理组品种整体的水分利用效率及产量都要高于对照组也就是‘郑单 958’的水分利用效率及产量。但是就‘农华 101’与‘郑单 958’来看, ‘农华 101’水分利用效率的效应值 SMD=-1.42, 表明在此滴灌水平下‘农华 101’的水分利用效率低于‘郑单 958’的水分利用效率。此外, ‘秋乐 126’产量的效应值 SMD=-0.14, 即‘秋乐 126’的产量低于‘郑单 958’的产量。

对品种的水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 分析进行异质性检验, 水分利用效率的异质性检验结果为 $I^2=73\%$ ($50\%<73\%<75\%$), 表明研究有中度的异质性; 产量的异质性检验结果为 $I^2=65\%$ ($50\%<65\%<75\%$), 表明研究有中度的异质性。

3 讨论

已知有关玉米节水增产的研究都是在某一特定

区域展开的, 由于不同的区域、气候和田间管理措施都有所差异, 研究之间缺少综合分析, 所得结果的参考性不强; 虽然有研究进行了综合分析讨论, 也是定性分析偏多, 缺乏定量分析。此外, 开展田间试验费时费力, 重新设计试验并逐一实施的可行性较差。因此, 有必要利用目前已发表的田间独立试验的研究结果, 系统采取科学统计学方法对灌溉量、灌溉方式等因素对玉米水分利用效率及产量的影响进行综合定量分析。

本研究的 Meta-Analysis 分析结果发现, 玉米水分利用效率的效应值随灌溉水平的降低呈现先增大后减小的趋势, 并在 80%~100% ET_c 的灌溉水平下水分利用效率的效应值最大, 此灌溉水平下产量的效应值也较高。总体上看, 不同灌溉水平对玉米产量效应值的影响不大, 特别是 80%~100% ET_c 和 100%~120% ET_c 这 2 个灌溉水平下产量的效应值相差不多, 然而水分利用效率的效应值差异却十分明显; 过高或过低的灌溉水平均不利于玉米产量的提升, 也不利于玉米水分利用效率的提高。本结论与王东等^[22]在葡萄滴灌量研究中得出的结论相似。赛力汗·赛等^[23]研究新疆冬小麦灌溉量对产量形成与水分利用的影响也得出了类似的结论, 即冬小麦籽粒产量和水分利用效率随滴灌量的增加呈现“先升后降”趋势。因为过量灌溉下的土壤环境条件会受到破坏, 土壤通透性变差, 也易造成养分流失^[24]; 而过低的滴灌量又不能满足作物正常的

表6 不同品种玉米水分利用效率及产量的 Meta-Analysis 分析结果

Table 6 Results of Meta-Analysis on water use efficiency and yield of maize varieties

项目 Item	处理组品种 Treatment variety	对照组品种 Control variety	效应值 SMD	95%置信区间 95%-CI	权重/% Weight	
水分利用效率 Water use efficiency	西蒙 6 号 Ximeng 6	郑单 958 Zhengdan 958	2.11	[0.65, 3.57]	23.8	
	沈单 10 号 Shendan 10	郑单 958 Zhengdan 958	2.39	[0.37, 4.41]	20.6	
	秋乐 126 Qiule 126	郑单 958 Zhengdan 958	2.64	[0.69, 4.58]	21.0	
	农华 101 Nonghua 101	郑单 958 Zhengdan 958	-1.42	[-3.30, 0.45]	21.4	
	京科 958 Jingke 958	郑单 958 Zhengdan 958	4.53	[1.03, 8.04]	13.2	
	合并 Merge		1.84	[0.10, 3.58]	100.0	
	产量 Yeild	西蒙 6 号 Ximeng 6	郑单 958 Zhengdan 958	1.31	[0.06, 2.55]	27.2
		沈单 10 号 Shendan 10	郑单 958 Zhengdan 958	2.36	[0.35, 4.38]	20.4
秋乐 126 Qiule 126		郑单 958 Zhengdan 958	-0.14	[-1.41, 1.12]	27.0	
农华 101 Nonghua 101		郑单 958 Zhengdan 958	2.31	[0.05, 4.56]	18.5	
京科 958 Jingke 958		郑单 958 Zhengdan 958	6.70	[1.82, 11.57]	6.9	
合并 Merge			1.69	[0.26, 3.12]	100.0	

生长需求。因此在节约农业用水、提高农业用水效率的背景下,采用 80%~100% ET_c 的灌溉水平进行灌溉,既能保证较高的玉米产量,又可以提升玉米的水分利用效率。

在以往分析不同灌溉方式对玉米水分利用效率与产量的研究中,不同灌溉方式下其灌溉水平不尽相同,因此为探究在 80%~100% ET_c 的灌溉水平下滴灌方式对玉米水分利用效率及产量的影响是否优于其他灌溉方式,本研究进一步分析了在 80%~100% ET_c 的灌溉水平下,不同灌溉方式对玉米水分利用效率及产量的影响。结果显示采用滴灌的方式可以保证较高的水分利用效率效应值及产量效应

值,说明滴灌方式的节水增产的效果最好,与已有研究结果一致^[25]。采用漫灌的方式得到的水分利用效率效应值及产量效应值最差。畦灌水分利用效率的效应值较低,而产量的效应值较高;沟灌水分利用效率的效应值较高,而产量的效应值较差。王芳等^[26]研究发现宁夏枸杞滴灌模式下水生产率较漫灌提高了 112.12%,但 2 种模式下的枸杞产量无明显差异;宜丽宏等^[27]对山西省冬小麦进行灌溉模拟同样发现滴灌比漫灌的水分利用效率及产量都要高,节水高产效果显著。因为滴灌少量多次的特点,土壤蒸发和深层渗漏都较漫灌要小,土壤环境、土壤通透性也好,所以采用滴灌方式的水分利用效率要

高,产量也可以得到保证^[28]。

同时在 80%~100% ET_c 的灌溉水平的基础上,本研究探索了不同品种对玉米水分利用效率与产量的影响。结果显示:以‘郑单 958’为对照,‘西蒙 6 号’、‘沈单 10 号’、‘秋乐 126’和‘京科 958’的水分利用效率效应值都比对照品种的水分利用效率效应值要高;‘农华 101’的水分利用效率效应值则低于对照品种的水分利用效率效应值。‘西蒙 6 号’、‘沈单 10 号’、‘农华 101’和‘京科 958’的产量效应值都比对照品种的产量效应值要高;‘秋乐 126’的产量效应值则低于对照品种的产量效应值,‘京科 958’得到的水分利用效率的效应值及产量的效应值均最高。因此,在 80%~100% ET_c 的灌溉水平下,不同品种对玉米水分利用效率及产量的影响不可忽视,而‘种植京科 958’的节水增产效果最好。品种的差异对玉米水分利用效率及产量都有影响,但是对比灌溉方式对玉米水分利用效率及产量的影响来看,品种间的差异不及灌溉方式对玉米水分利用效率及产量的影响大。在研究玉米节水增产时,应优先考虑灌溉方式对玉米水分利用效率及产量的影响。综上所述,采用滴灌灌溉方式种植品种为‘京科 958’的玉米,并使滴灌水平控制在 80%~100% ET_c 水平,则所获得的玉米节水高产效果最优。

本研究利用 Meta-Analysis 探讨了不同滴灌水平、同等灌溉水平下不同灌溉方式、品种对玉米水分利用效率与产量的影响,异质性结果显示均有中低度的异质性,但均满足 $I^2 \leq 75\%$,表明结果满足异质性检验。中低度的异质性结果说明虽然制定了统一的文献纳入标准,但是各个田间试验的处理、土壤、气候等因素仍存在差异性,也就导致了结果出现了一定的异质性。

4 结 论

本研究通过对 21 篇文献的 94 组玉米灌溉方式、灌溉水平和品种方面的数据进行 Meta-Analysis 分析,结果表明玉米水分利用效率的效应值随灌溉水平的降低呈现先增大后减小的趋势,在 80%~100% ET_c 的灌溉水平下水分利用效率的效应值最大,此时灌溉水平下产量的效应值也较高。同时,在此灌溉水平下滴灌的水分利用效率与产量确实优于其他灌溉模式,并且种植‘京科 958’节水高产的效果最优。因此,建议在我国北方灌溉区域(35°~45° N,

100°~125° E)采用滴灌灌溉方式,能够增产节水。同时使滴灌水平控制在 80%~100% 的 ET_c,节水增产的效果更优。

参考文献 References

- [1] 李少昆,赵久然,董树亭,赵明,李潮海,崔彦宏,刘永红,高聚林,薛吉全,王立春,王璞,陆卫平,王俊河,杨祁峰,王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959
Li S K, Zhao J R, Dong S T, Zhao M, Li C H, Cui Y H, Liu Y H, Gao J L, Xue J Q, Wang L C, Wang P, Lu W P, Wang J H, Yang Q F, Wang Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959 (in Chinese)
- [2] 负来强,高苗苗. 玉米种植现状及新技术应用价值探究[J]. 新农业, 2021(4): 44
Yun L Q, Gao M M. Research on the current situation of maize planting and application value of new technology[J]. *Modern Agriculture*, 2021(4): 44 (in Chinese)
- [3] 漆栋良,胡田田,宋雪. 交替隔沟灌溉制度对制种玉米耗水规律和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 64-70
Qi D L, Hu T T, Song X. Effect of irrigation regime on water consumption pattern and grain yield of seed maize under partial root zone irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 64-70 (in Chinese)
- [4] 徐明明,赵月芬,张彦群,王建东,王传娟,莫彦,吴忠东. 充分滴灌不同覆盖处理对春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2020(12): 10-16
Xu M M, Zhao Y F, Zhang Y Q, Wang J D, Wang C J, Mo Y, Wu Z D. Effects of adequate drip irrigation with different mulching treatments on spring maize yield and water use efficiency[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(12): 10-16 (in Chinese)
- [5] 赵雁群,谷利敏. 夏玉米畦田节水节肥管理技术[J]. 种业导刊, 2021(2): 6-8
Zhao Y Q, Gu L M. Management technology of water saving and fertilizer saving in summer maize border field[J]. *Journal of Seed Industry Guide*, 2021(2): 6-8 (in Chinese)
- [6] 王利华. 节水灌溉技术在制种玉米上的应用研究[J]. 新农业, 2021(5): 7
Wang L H. Study on application of water-saving irrigation technology in seed production of maize[J]. *Modern Agriculture*, 2021(5): 7 (in Chinese)
- [7] 孙仕军,杨鑫鑫,万博,谷健,刘泳圻,赵旺,尹光华. 不同滴

- 灌方式对辽西半干旱区春玉米生长及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(1): 32-39
- Sun S J, Yang J X, Wan B, Gu J, Liu Y Q, Zhao W, Yin G H. Effects of different drip irrigation methods on the growth and yield of spring maize in semi-arid areas of western Liaoning [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2021, 52(1): 32-39 (in Chinese)
- [8] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 陈新平, 张福锁, 毛达如. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 334-340, 307
- Pan J R, Ju X T, Liu X J, Chen X P, Zhang F S, Mao D R. Fate of fertilizer nitrogen for winter wheat/summer maize rotation in North China plain under optimization of irrigation and fertilization [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2): 334-340, 307 (in Chinese)
- [9] 戴嘉璐, 李瑞平, 李聪聪, 鲁耀泽, 邹存菁. 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
- Dai J L, Li R P, Li C C, Lu Y Z, Zou C J. Effects of water saving and fertilizer reducing on water and nutrients of maize at different growth stages in the Hetao irrigated area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 271-277 (in Chinese)
- [10] 杨涛, 梁宗锁, 薛吉全, 康绍忠. 不同玉米品种水分利用效率的差异性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 21-25
- Yang T, Liang Z S, Xue J Q, Kang S Z. Diversity of water use efficiency of various maize varieties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(10): 21-25 (in Chinese)
- [11] Gurevitch J, Curtis P S, Jones M H. Meta-analysis in ecology [M]// *Advances in Ecological Research*. Amsterdam: Elsevier, 2001: 199-247
- [12] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156
- [13] 彭少麟, 郑凤英. Meta分析: 综述中的一次大革命[J]. 生态学杂志, 1999, 18(6): 65-70
- Peng S L, Zheng F Y. Meta-analysis: A great revolution in review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(6): 65-70 (in Chinese)
- [14] Jarvinen A. A meta-analytic study of the effects of female age on laying-date and clutch-size in the Great Tit *Parus major* and the Pied Flycatcher *Ficedula hypoleuca*[J]. *IBIS*, 1991, 133(1): 62-67
- [15] 郑侃, 何进, 李洪文, 王庆杰, 李问盈. 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 K, He J, Li H W, Wang Q J, Li W Y. 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 (in Chinese)
- [16] 毛晋花, 邢亚娟, 闫国永, 王庆贵. 陆生植物生物量分配对模拟氮沉降响应的 meta 分析[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3183-3194
- Mao J H, Xing Y J, Yan G Y, Wang Q G. A meta-analysis of the response of terrestrial plant biomass allocation to simulated N deposition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3183-3194 (in Chinese)
- [17] 王文立, 孔维栋, 曾辉. 土壤微生物对增温响应的 meta 分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2169-2175
- Wang W L, Kong W D, Zeng H. A meta-analysis of responses of soil microbes to warming[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2169-2175 (in Chinese)
- [18] Bender D J, Contreras T A, Fahrig L. Habitat loss and population decline: A meta-analysis of the patch size effect[J]. *Ecology*, 1998, 79(2): 517-533
- [19] 邹凌云, 杨柳, 何晓玲, 宋祎, 徐锦江. 有氧运动对乳腺癌患者癌因性疲乏疗效的 meta 分析[J]. 中国全科医学, 2014, 17(13): 1524-1528, 1537
- Zou L Y, Yang L, He X L, Song Y, Xu J J. Effects of aerobic exercise on cancer-related fatigue in breast cancer patients receiving chemotherapy: A meta-analysis[J]. *Chinese General Practice*, 2014, 17(13): 1524-1528, 1537 (in Chinese)
- [20] Nakagawa S, Noble D W A, Senior A M, Lagisz M. Meta-evaluation of meta-analysis: Ten appraisal questions for biologists[J]. *BMC Biology*, 2017, 15(1): 18
- [21] 姜言娇, 袁园园, 薛丽, 武术兰, 黄峰. 基于 meta 分析的灌溉模式对温室番茄产量和水分生产力的影响[J]. 节水灌溉, 2020(3): 40-45
- Jiang Y J, Yuan Y Y, Xue L, Wu S L, Huang F. Meta-analysis of effect of irrigation mode on yield and water productivity of greenhouse tomato [J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(3): 40-45 (in Chinese)
- [22] 王东, 曹源倍, 吉遥芳, 傅渝亮. 不同滴灌量对红寺堡区酿酒葡萄生长和品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(1): 154-161
- Wang D, Cao Y B, Ji Y F, Fu Y L. Effects of different drip irrigation on the growth and quality of wine grapes in Hongsibu District [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(1): 154-161 (in Chinese)

- [23] 赛力汗·赛, 张永强, 薛丽华, 梁玉超, 雷钧杰, 陈兴武, 王志敏. 新疆滴灌冬小麦灌溉量对产量形成与水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(8): 30-40
Sailihan · Sai, Zhang Y Q, Xue L H, Liang Y C, Lei J J, Chen X W, Wang Z M. Effects of different drip irrigation amount on yield formation and water use of winter wheat in Xinjiang [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(8): 30-40 (in Chinese)
- [24] 刘森. 生育期过量灌溉对膜下滴灌棉花生长发育影响的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2009(10): 9
Liu S. Excessive irrigation during growth period affected the growth and development of cotton under drip irrigation under film impact study [J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2009(10): 9 (in Chinese)
- [25] 邹宇锋, 蔡焕杰, 张体彬, 王云霏, 徐家屯. 河套灌区不同灌溉方式春玉米耗水特性与经济效益分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 237-248
Zou Y F, Cai H J, Zhang T B, Zhang T B, Wang Y F, Xu J T. Water use characteristics and profit analysis of spring maize production with different irrigation methods in Hetao irrigation district [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(9): 237-248 (in Chinese)
- [26] 王芳, 张妹婷, 马丽萍, 马佳伟, 南雄雄. 灌溉方式对宁夏枸杞园土壤碳库特征及枸杞生长的影响[J]. 节水灌溉, 2019(7): 1-5
Wang F, Zhang M T, Ma L P, Ma J W, Nan X X. Effects of irrigation method on soil carbon characteristics and growth of goji berry [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(7): 1-5 (in Chinese)
- [27] 宜丽宏, 王丽, 张孟妮, 毛平平, 党建友, 吴会军, 李银坤, 张永清, 张晶, 裴雪霞, 武雪萍. 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 L H, Wang L, Zhang M N, Mao P P, Dang J Y, Wu H J, Li Y K, Zhang Y Q, Zhang J, Pei X X, Wu X P. Effect of irrigation methods on growth and water use efficiency of winter wheat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(10): 14-19 (in Chinese)
- [28] 要家威, 齐永青, 李怀辉, 沈彦俊. 地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1076-1084
Yao J W, Qi Y Q, Li H H, Shen Y J. Water saving potential and mechanisms of subsurface drip irrigation: A review [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6): 1076-1084 (in Chinese)

责任编辑：杨爱东