

doi: 10.3969/j.issn.1671-7775.2019.03.014

基于 Meta 评价控制性分根交替灌溉的作物水分利用效率

郑健^{1 2 3}, 潘占鹏^{1 2 3}, 颜斐^{1 2 3}, 冯正江^{1 2 3}, 马彪^{1 2 3}

(1. 兰州理工大学 西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了确定控制性分根交替灌溉 (CRDI) 对作物水分利用效率 (WUE_C) 的作用, 收集 CRDI 的相关试验数据, 应用 Meta 分析方法定量分析了不同区域、气候条件、种植条件、灌溉制度和作物类型下 CRDI 对 WUE_C 的影响。结果表明: 在中国范围内, CRDI 提升 WUE_C 为 28.9%, 西北地区 WUE_C 提升最为显著达到了 49.29%; 年均降水量在 200 ~ 800 mm 的区域, CRDI 能够使 WUE_C 提升 29.92%, 而在南方地区和年均降水量 > 800 mm 的区域, WUE_C 提升不显著; 在年均气温高于 12 °C 的区域 WUE_C 提升更明显, 可以达到 36.98%; CRDI 在温室大棚中 WUE_C 提升最为显著, 达到了 53.45%; CRDI 技术应用到地面畦灌、固定灌溉、沟灌和滴灌后, 其 WUE_C 分别提升 37.03%, 21.41%, 16.59% 和 32.56%。可见控制性分根交替灌溉能有效提高 WUE_C , 但提升率会受到作物种植条件、种植区域的气候条件、灌溉方法和作物种类等因素的影响。

关键词: 控制性分根交替灌溉; 水分利用效率; 提升率; 影响因素; Meta 分析

中图分类号: S275.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-7775(2019)03-0332-06

引文格式: 郑健, 潘占鹏, 颜斐, 等. 基于 Meta 评价控制性分根交替灌溉的作物水分利用效率[J]. 江苏大学学报(自然科学版) 2019, 40(3): 332-337.

Evaluation of crop water use efficiency for controlled root-dividing alternate irrigation based on Meta-analysis

ZHENG Jian^{1 2 3}, PAN Zhanpeng^{1 2 3}, YAN Fei^{1 2 3}, FENG Zhengjiang^{1 2 3}, MA Biao^{1 2 3}

(1. Western Energy and Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Energy Supply System Driven by Biomass and Solar Energy of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: To determine the effects of controlled root-dividing alternate irrigation (CRDI) on crop water use efficiency (WUE_C), the test data of CRDI was collected, and the effects of CRDI on WUE_C in different regions, climatic conditions, planting conditions, irrigation schemes and crop types were analyzed by Meta-analysis method. The results show that CRDI can increase WUE_C by 28.9% in China, and WUE_C is increased most significantly by 49.29% in Northwest. In the area where the annual average precipitation is between 200 and 800 mm, CRDI can increase the crop WUE_C by 29.92%. However, in the south and the area where the annual average precipitation is greater than 800 mm, the increasing of WUE_C is not significant. CRDI significantly increases the WUE_C of crops by 36.98% when the average

收稿日期: 2018-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509122, 51369014); 甘肃省高等学校科技成果转化项目(2018D-04); 甘肃省自然科学基金资助项目(18JR3RA154); 2018年杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2018CXY-14)

作者简介: 郑健(1981—), 男, 新疆阿克苏人, 博士, 副教授(zhj16822@126.com), 主要从事农业水土工程研究。

潘占鹏(1992—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生(18394539731@163.com), 主要从事农田水利、节水灌溉研究。

annual temperature is higher than 12 °C. In the greenhouse, the increasing of WUE_c is the most significant by 53.45%. Applying CRDI into flood irrigation, fixed irrigation, furrow irrigation and drip irrigation, the values of WUE_c are increased by 37.03%, 21.41%, 16.59% and 32.56%, respectively. CRDI can significantly improve the WUE_c of different crops, and it is affected by the physiological growth characteristics of crop and test area.

Key words: controlled root-dividing alternate irrigation; water use efficiency; increasing rate; influence factor; Meta-analysis

作物的水分利用效率(crop water-use efficiency, WUE_c)指植物消耗单位水量生产出的同化量,该指标是评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标,也是评价一个地区农业水资源的管理、利用水平和节水农业技术措施实施效果的重要指标之一^[1].全世界大约有20%的农田是灌溉农田,所产粮食占全球粮食产量的40%.面对不断增长的人口压力以及水资源的短缺,提升水分利用效率对可持续农业的发展至关重要^[2],因此需要有更有效的方式来提高作物水分利用效率.

控制性分根交替灌溉(controlled root divided alternative irrigation, CRDI)是指作物在生长期内在其根区两侧交替灌溉,以刺激植物根系吸水功能和改变根区剖面土壤湿润方式为核心,调节气孔开度,减少植株“奢侈”蒸腾,提高水分利用效率,从而达到节水、高产和优质的目的^[3].试验研究表明,该灌溉技术能够通过调节作物生理生态指标和土壤环境条件,提升作物产量品质和提高 WUE_c .但是在试验条件等不同因素的影响下,CRDI对 WUE_c 的提升程度是否存在差异,以及某种条件下该灌溉方法是否还具有意义都是需要研究的问题.作为一种有效且被广泛应用的节水灌溉方式,定量研究其不同条件下对 WUE_c 的影响具有重要的意义.

Meta分析^[4]是一种对同一主题下的多个独立试验进行综合的统计分析方法,目前已经在生态领域得到了广泛的应用^[5].而在农业及农业工程领域Meta分析的应用研究仍处于起步阶段.文中通过收集控制性分根交替灌溉的相关试验研究数据,应用

Meta分析定量分析不同区域、气候条件、种植条件、灌溉制度和作物类型对 WUE_c 的影响.

1 材料与方法

1.1 数据来源

通过中国知网、万方、维普以及 Web of Science, Engineering Village, Springer 和 Elsevier 等中英文数据库的检索,收集截止2017年10月31日国内外公开发表的关于中国“控制性分根交替灌溉”与“水分利用效率(WUE_c)”的试验研究论文.为减小偏差并满足Meta分析对数据的要求,基于以下标准确定该研究的分析样本:①在中国范围内试验,试验地点和年份清楚;②试验处理同时包括控制性分根交替灌溉和反映作物产量水平的水分利用效率(WUE_c);③文中给出反映作物产量水平的水分利用效率的均值及标准差,或提供了相关试验处理的重复数;④剔除试验数据相同的文献.经过以上标准筛选,共获得37篇参考文献,114组数据.对符合标准的文献提取试验地点、种植方式、灌溉制度、作物类型、相关气象信息和 WUE_c 的平均值等数据信息.

1.2 数据分类

对已有的数据以多种方式进行分组,以检验某一特定以及交叉因素对CRDI下农田 WUE_c 的影响,如地域、降水量、温度、种植方式和作物类型等,其中作物类型主要集中在番茄、小麦、玉米和棉花4类,如表1所示.

表1 试验样本信息描述

区域划分	省份	年均降雨量/mm	年均温度/°C	种植条件	灌溉制度 (试验-对照)	作物类型
西北地区	甘肃、内蒙古、陕西、河南、新疆	400~600(东部) <200(西部)	<10.0		CRDI-CK	番茄、小麦
				大田	ADI-CDI	玉米、棉花
东北地区	辽宁	712.8	8.0	盆栽	CRDI-FXI	黄瓜、葡萄
南方地区	云南、广西、江苏	800~1300	15.7~21.0	温室	AFI-CFI	马铃薯、苹果
					AFI-CK	甜瓜

注:试验与对照处理的灌溉制度 CRDI-FXI、CRDI-CK、AFI-CK、AFI-AFI 和 ADI-CDI 分别代表传统分根交替灌溉-固定灌溉、传统分根交替灌溉-地面畦灌、分根交替沟灌-地面畦灌、分根交替沟灌-传统沟灌、分根交替滴管-传统滴管.

1.3 数据分析

利用 MetaWin2.1 软件中的随机效应模型对筛选文献中提取的数据进行 Meta 分析. 按照 L. V. HEDGES 等^[6] 计算效应值的方法, 将反应比的自然对数作为计算的样本效应值, 计算公式为

$$\ln R = \ln (Y_e - Y_c) , \quad (1)$$

式中: R 为反应比; Y_e 为处理组的 WUE_c ; Y_c 为对照组的 WUE_c .

为了更加直观地反映 CRDI 对 WUE_c 的效应量的反应, 将效应量 $\ln R$ 转化为提升率 Z :

$$Z = (\exp(\ln R) - 1) \times 100\% . \quad (2)$$

当研究文献中报道了对照组和试验组的平均值、标准差或标准误差, 以及试验样本量时, 对试验数据进行 Meta 分析很方便. 但是在数据的整合分析中, 常常会遇到原始文献中相关数据报道不全面的问题, 最常见的是标准差. 为了解决此问题, 采用 Rosenberg 等提出的方法, 先用非权重平均法来计算出各指标的效应值, 效应值的显著性通过 999 次再

取样进行检验, 95% 置信区间通过 MetaWin2.1 软件所整合的自助法(Bootstrap)^[7] 非加权数据来产生, 然后通过随机检验法来进行异质性检验. Z 的 95% 区间如果全部 >0 , 表示与对照相比, 试验组的 CRDI 方法对 WUE_c 具有显著正效应; <0 则说明试验组的 CRDI 方法对 WUE_c 具有显著负效应; 包含 0, 则说明试验组的 CRDI 方法对 WUE_c 无显著影响.

采用 Meta 分析必须检验多个独立研究的合并统计量是否具有统计学意义. 文中需要检验 Z 值, 当 95% 置信区间 CI 上下限不包含 0 时, 等价于 $P < 0.05$, 即具有统计学意义, 表明该分类的 CRDI 对 WUE_c 有显著性影响, 反之表示没有显著性影响.

2 结果分析

2.1 组间异质性分析

对使用 CRDI 和不使用 CRDI 下的 WUE_c 计算综合效应量(表 2).

表 2 基于 CRDI 处理的不同分类变量形态指标的组间异质性显著水平的比较(随机效应模型)

变量	分类变量	置信区间(95%)		组间异质性(Q)	P
		下限	上限		
处理	全部处理	0.201 1	0.306 5	109.852 6	<0.000 1
	CRDI-FXI	0.134 5	0.259 3	11.617 4	0.000 8
灌溉制度(试验-对照)	CRDI-CK	0.220 2	0.395 9	30.017 5	<0.000 1
	AFI-CFI	0.109 0	0.202 4	21.313 7	0.005 4
	ADI-CDI	0.194 4	0.374 6	20.904 2	<0.000 1
年均降雨量/mm	R_1	0.128 6	0.204 0	89.181 4	0.000 1
	R_2	0.299 2	0.404 9	88.853 9	<0.000 1
	R_3	-0.259 8	0.108 0	13.442 8	0.009 2
年均温度/℃	T_1	0.166 3	0.245 7	95.083 2	<0.000 1
	T_2	0.251 7	0.378 8	95.590 2	<0.000 1
种植条件	大田	0.157 8	0.239 1	102.431 5	<0.000 1
	盆栽	0.207 0	0.321 0	29.367 7	<0.000 1
	温室	0.359 2	0.497 1	50.665 0	<0.000 1
区域划分	东北地区	0.251 5	0.392 4	10.347 7	0.189 0
	南方地区	-0.077 4	0.182 5	8.282 1	0.004 1
	西北地区	0.384 6	0.415 4	40.014 2	<0.000 1
作物类型	小麦	0.229 8	0.403 8	86.000 0	0.007 4
	番茄	0.102 5	0.225 9	43.604 1	<0.000 1
	玉米	0.119 4	0.237 3	33.172 9	0.044 2
	棉花	0.091 3	0.166 9	16.167 7	0.014 7

注: T_1 和 T_2 分别为年平均温度小于和大于 12℃ 的区域; R_1 、 R_2 和 R_3 分别为年均降雨量 <200 mm、200 至 800 mm 之间和 >800 mm 的区域.

由表 2 可知, 异质性检验结果达到极显著水平 ($P < 0.01$), 故采用随机效应模型; 通过分析发现, 在 CRDI 对照非 CRDI 处理条件下, 除年均降雨量 >800 mm (95% CI: -25.98 ~ 10.80) 和南方地区 (95% CI: -7.74 ~ 18.25) 的 WUE_c 没有表现出显著提升外, 其他条件下该灌溉方式均可显著提升 WUE_c , 但 WUE_c 的提升效应因地域、气候条件、种植和灌溉制度、作物类型等均表现出了一定差异. 说明

用于 Meta 分析的数据除以上两个相关区域外, 其他采用 Meta 分析的多个独立研究的合并统计量具有统计学意义 (95% 置信区间不包含 0).

2.2 不同种植区域、温度、降雨条件下 CRDI 对 WUE_c 的影响

图 1 为 CRDI 在不同区域等条件下对 WUE_c 的影响. 图 1 2 中的误差线表示 95% 置信区间, 括号中的数字表示所研究的相应分组数据样本数. 置信

区间上下限在 WUE_c 提升率值的上下侧时表示有显著差异,同侧则表示无显著差异或差异不显著。

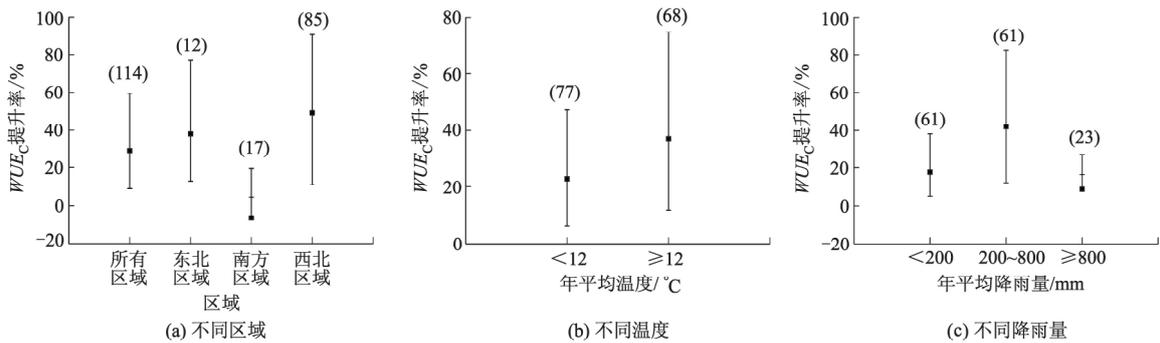


图 1 CRDI 在不同区域等条件下对 WUE_c 的影响

由图 1a 可见,西北地区 CRDI 对 WUE_c 提升率达 49.29%,东北地区次之,为 37.96%,CRDI 对 WUE_c 产生了显著影响;而在南方地区,CRDI 对 WUE_c 的提升无显著影响,Meta 软件分析显示其在 95% 置信区间包含 0 (95% CI: -7.74 ~ 18.25) (见表 2). 说明 CRDI 在北方地区对 WUE_c 的提升效果较好。

由图 1b 可见,不同年均气温条件下,CRDI 均能提高 WUE_c ,但在年均温度 < 12°C 的中国区域,其 WUE_c 的提升率为 22.81%,而在 > 12°C 的区域为 36.98%,两者相差 14.17%,但都对 WUE_c 有显著的提升,表明在不同温度区域 CRDI 均能有效提高

WUE_c ,但提升率受到年气温的影响;从降水量来看,与年均降水量 < 200 mm 的地区相比,CRDI 对年均降雨量在 200 ~ 800 mm 的地区 WUE_c 提升更为明显,提升率幅度较大,分别为 17.57% 42.01%;而对年均降雨量 > 800 mm 的地区,未能使 WUE_c 提升显著,置信区间包含 0 (95% CI: -25.98 ~ 10.80) (表 2,图 1c),表明制性分根交替灌溉的更适用于年均 200 ~ 800 mm 降水的地区。

2.3 不同种植条件、灌溉制度、作物类型下 CRDI 对 WUE_c 的影响

图 2 给出了 CRDI 在不同种植等条件下对 WUE_c 的影响。

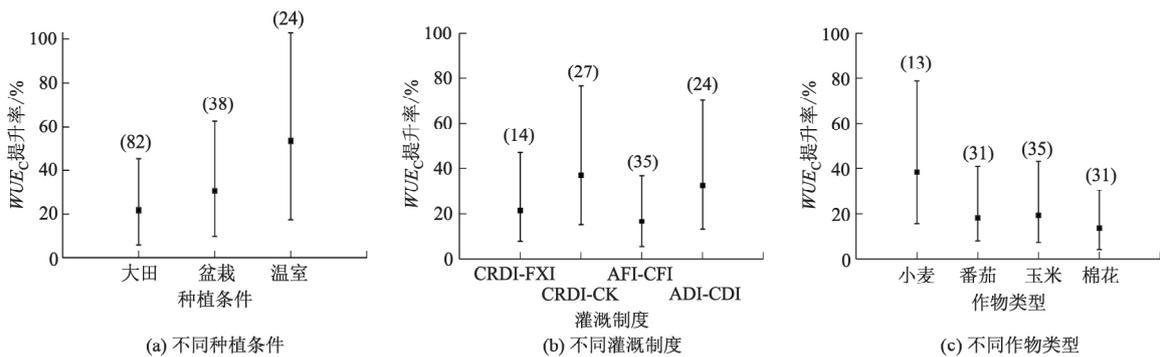


图 2 CRDI 在不同种植等条件下对 WUE_c 的影响

由图 2a 可见,CRDI 在温室大棚条件下表现最好,其 WUE_c 的提升效果最好,为 53.45%;盆栽次之为 30.45%;大田试验最低,仅为 21.75%,温室试验对 WUE_c 的提升率的结果比大田试验要高出一倍多. 表明 CRDI 在不同的种植条件下均能提高 WUE_c ,更适宜于在设施农业中推广应用,也进一步说明不同的种植试验条件会对 WUE_c 的提升率产生一定影响。

由图 2b 可见,在常规 CRDI 对照固定灌溉和地面畦灌试验中, WUE_c 的提升率分别为 21.41% 和

37.03%;在分根交替沟灌对正常沟灌试验中, WUE_c 的提升率为 16.59%,在分根交替滴灌对正常滴灌试验中 WUE_c 的提升率为 32.56%. 结果表明 CRDI 技术适宜于多种灌溉方式,并在不同灌溉方式中应用 CRDI 技术均能够有效提高 WUE_c ,减少水分的无效损耗。

由图 2c 可知,在本次研究较集中的 4 种作物中,CRDI 对 WUE_c 均有所提高,但在不同作物种类中存在一定差异,小麦的 WUE_c 提升率最高,达到了 28.42%,番茄、玉米和棉花的提升率分别为

18.29%、19.39%、13.53%。表明作物自身对水分条件的敏感程度也会对其 WUE_c 产生一定影响。

3 讨论

3.1 CRDI 提升 WUE_c 的机理

与不使用 CRDI 相比,CRDI 可使中国地区 WUE_c 提升 28.9% (图 1a),而且不同条件下, WUE_c 的提升率存在一定差异。CRDI 能提升 WUE_c 的主要原因包括:①在灌溉过程中,使土壤垂直剖面或水平面的某个区域保持干燥,仅让另一部分区域灌水湿润,使不同区域的根系交替经受一定程度的水分胁迫锻炼,使作物部分根系处于水分胁迫下,并产生根源信号脱落酸(ABA),调节气孔导度;而处于湿润部分的根系吸收水分保证作物光合,达到不牺牲作物光合产物积累而减少其蒸腾耗水的目的,同时还可减少植株间土壤表面蒸发损失,并减少深层渗漏^[3];文中研究表明,常规分根交替供水比常规地面畦灌(CRDI-CK)节水 37.03% (图 1a);②CRDI 可降低土壤机械强度,改善土壤的通透性,促进根系的补偿生长,提高根系对水分的吸收利用;③CRDI 通过对根系的补偿生长,从而提高了根系对养分的有效吸收利用,但不牺牲作物的总物质含量累积。

3.2 CRDI 提升 WUE_c 的影响因素分析

3.2.1 地域

在西北偏西地区年均降雨量 <200 mm、偏东地区为 400~600 mm (表 1),地面畦灌是最为普遍的灌水方式,存在灌溉用水的大量浪费,导致灌溉水利用水平的低下^[8];而 CRDI 作为一种新型高效的灌溉方式,可实现灌溉用水的高效利用;我国东北地区年均降水量为 712.8 mm (表 1),较西北地区高,但夏季多高温、蒸发量大,冬季和春季太阳辐射能量小,致使地温增长缓慢不利于作物生长,且传统的地面畦灌方式降低了作物的水分利用效率。而 CRDI 能够通过促进根系的补偿生长,提高了根系对水分和养分的利用,同时有效地调节了作物的气孔开度,达到提高作物水分利用效率的作用^[9];我国南方地区年均降雨量在 800~1300 mm、气候湿润,很多地方丰富的水资源足以满足作物生长用水,因此 CRDI 对南方地区的意义远弱于北方地区。

3.2.2 气候特征

在干旱地区,降雨量少、土壤严重缺水,因此作物的生长用水主要来自灌溉^[8],CRDI 以水分胁迫

来促进作物根部的生长和调节叶片的气孔开度,进一步提升 WUE_c ;但在年均降雨量 <200 mm 的地区,由于气候因素的影响,损失的灌溉水量较年均降雨量在 200~800 mm 的区域大。而年均降雨量 \geq 800 mm 的区域降水丰富,CRDI 难以使土壤间歇性的处于干旱区,改善土壤的通透性,很难体现出 CRDI 的优越性。且 CRDI 以水分胁迫来促进作物根部的生长和调节叶片的气孔开度,适当地抑制蒸腾作用,不仅可减少水分消耗,而且对植物生长也有利。由于农业灌溉水分的浪费大多源自于作物蒸腾和土壤蒸发,因此相比温度较低的区域,CRDI 对温度较高区域 WUE_c 的提升空间更大。

文中发现,相比年均降雨量 <200 mm (干旱区)和年均温度 <12℃ 的区域,CRDI 对 WUE_c 的提升在年均降雨量为 200~800 mm 和年均温度 \geq 12℃ 的区域 WUE_c 的提升大,且对年均降雨量 \geq 800 mm 的区域未见 WUE_c 的显著提升效应。

3.2.3 种植条件

温室大棚中的温度比较高,灌水较多会导致大棚内湿度过高,易导致作物叶片气孔的闭合,影响作物的光合作用,对物质积累也带来影响^[8]。而 CRDI 减少了灌溉水量和土壤湿润面积,蒸发水分少,大棚内湿度也较低,能够调节叶片气孔行为,因此温室中 WUE_c 的提升率较高。盆栽试验大多在温室中进行,土壤、肥料、水分等条件容易控制,试验过程中也能获得较好的 WUE_c 的提升。大田试验的可控性最差,各种环境因素(光照、降雨等)的影响难以控制,较温室与盆栽条件下 WUE_c 的提升率出现一定的降低。因此,文中获得的 CRDI 在温室大棚中对 WUE_c 的提升率最高,盆栽次之,大田试验最低是合理的。

3.2.4 灌溉方式

地面畦灌灌水量大,导致根部土壤的通透性变差,降低了根系的活力,影响了养分的吸收;固定灌溉使得土壤水分长期处于亏缺状态,影响了根系在土壤中的均匀分布,且土壤中的养分得不到吸收和利用;传统沟灌模式下,地表长时间保持湿润,不但棚温、地温降低太快,回升较慢,且蒸发量加大,室内湿度太高,易导致作物病虫害发生,影响作物的生长^[9]。由于滴灌只湿润部分土壤,加之作物的根系有向水性,会引起作物根系集中向湿润区生长,影响作物的根系发育与养分的吸收;而 CRDI 解决了固定灌溉导致的土壤水分长期处于亏缺和滴灌导致的限制根系的发展与营养吸收的不利影响,减少了土壤湿润面积,土壤的通透性增加,蒸发水分少,有效

控制大棚内湿度^[3]. 文中得出,较传统灌溉方式,CRDI对 WUE_c 提升显著,且 WUE_c 的提升率由大到小顺序为地面畦灌、滴灌、固定灌溉、沟灌.

3.2.5 作物

冬小麦生长季节的降水量远远不能满足正常生长和高产的需要,尤其从抽穗到成熟这一生长阶段,正值春季干旱,小麦生长经常受到水分不足的威胁.采用交替灌水方式不仅可以刺激根系的生长和减少灌水量,还能使根系在土壤中均匀分布而充分利用水肥资源,进而提高 WUE_c 且使作物减产;番茄喜水,根系发达,茎叶繁茂,蒸腾作用较强,吸收能力强,但因其本身需水量较大,且存在较大的蒸腾^[10],对CRDI下 WUE_c 的提升有一定影响;玉米生长期较冬小麦短,春玉米4月下旬5月上旬播种,8月下旬可收获.秋玉米最迟于7月中旬播种,10月中下旬收,此阶段又适逢雨季,灌水量减少,致使 WUE_c 的提升空间较小.棉花是喜热作物比较耐干旱,且开花期(即授粉期)及收获期忌多雨.由于棉花的这种特殊生长特点以及生长环境,CRDI对于棉花 WUE_c 的提升较其他作物低.文中得出,较传统灌溉方式,CRDI对不同 WUE_c 均呈现出显著提升, WUE_c 的提升率由大到小顺序为冬小麦、番茄、玉米、棉花.

4 结论

1) 在不同试验区域内,控制性分根交替灌溉(CRDI)能够显著提升 WUE_c 达28.9%,其中西北地区为49.29%,东北地区为37.96%,对南方地区无显著影响,北方和南方地区存在显著差异.

2) CRDI在年均温度 $>12\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $<12\text{ }^\circ\text{C}$ 的区域对 WUE_c 的提升率分别为22.81%、36.98%;在年均降雨量为200~800 mm和 $<200\text{ mm}$ 的区域分别为17.75%、42.01%,对年均降雨量 $>800\text{ mm}$ 的区域无显著增加效应.

3) CRDI效应因种植条件不同互有差异,温室大棚中CRDI对 WUE_c 提升最明显,可提升53.45%,盆栽和大田分别为30.45%和21.75%.

参考文献(References)

- [1] 廖健程,胡德勇,裴毅,等.控制灌溉条件下增氧对超级稻根系生长及水分利用效率的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(9):920-924.
LIAO J C, HU D Y, PEI Y, et al. Effects of aeration on root growth and water use efficiency of super rice under controlled irrigation conditions [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 920-924. (in Chinese)
- [2] LIU Q F, CHEN Y, LIU Y, et al. Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of maize in the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 157: 1-10.
- [3] 康绍忠,张建华,梁宗锁,等.控制性交替灌溉:一种新的农田节水调控思路[J].干旱地区农业研究,1997,15(1):1-6.
KANG S Z, ZHANG J H, LIANG Z S, et al. The controlled alternate irrigation: a new approach of water saving regulation in farmland [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 1997, 15(1): 1-6. (in Chinese)
- [4] BORENSTEIN M, HEDGES L V, HIGGINS J P T, et al. Introduction to meta-analysis [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2009.
- [5] CROUZEILLES R, CURRAN M, FERREIRA M S, et al. A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success [J]. Nature Communications, doi: 10.1038/ncomms11666.
- [6] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [7] ROSENBERG M S, Adams D C, Gurevitch J. Metawin: statistical software for meta-analysis with resampling tests [J]. The Quarterly Review of Biology, 1998, 73(1): 126-128.
- [8] HOCHMUTH H, THEVS N, HE P. Water allocation and water consumption of irrigation agriculture and natural vegetation in the Heihe River watershed, NW China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 5269-5279.
- [9] 徐军用,姜俊.3种灌水方式对茄子生长、产量及品质的影响[J].河南农业科学,2014,43(8):110-112.
XU J Y, JIANG J. Effects of three kinds of irrigation modes on growth, yield and quality of eggplant [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2014, 43(8): 110-112. (in Chinese)
- [10] KUMAR P S, SINGH Y, NANGARE D D, et al. Influence of growth stage specific water stress on the yield, physico-chemical quality and functional characteristics of tomato grown in shallow basaltic soils [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 197: 261-271.

(责任编辑 梁家峰)