文章编号: 1672 - 3317 (2020) 05 - 0089 - 07

干湿循环作用下稻田地下水补给过程变化特征

夏超凡,洪大林,和玉璞*,纪仁婧,芮旭倩

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程国家重点实验室,南京 210029)

摘 要:【目的】探究节水灌溉模式条件下稻田地下水补给特征。【方法】采用定地下水埋深的蒸渗仪开展试验,分析节水灌溉干湿循环下稻田地下水补给量变化过程,研究地下水补给对节水灌溉稻田作物需水的贡献及对土壤水分的调节作用。【结果】控制灌溉稻田地下水补给过程频繁,当稻田干湿循环过程中土壤水分降至一定限度时,稻田地下水补给量在复水后(灌水或降雨)1d内出现峰值,稻季共出现16次峰值。控制灌溉稻田稻季地下水补给量达253.98 mm,约占水稻需水量的51.1%。稻田干湿循环中,在稻田地下水补给与土壤水入渗的综合作用下,30 cm 深度以下土壤含水率保持稳定,0~30 cm 深度土壤含水率总体呈下降趋势。【结论】节水灌溉干湿循环下稻田地下水补给量显著增加,有效补给了水稻需水。浅地下水埋深条件下,稻田地下水补给过程直接影响水稻根区土壤水分变化。 关键词:节水灌溉;稻田;地下水补给;干湿循环

中图分类号: S274

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019363

夏超凡, 洪大林, 和玉璞, 等. 干湿循环作用下稻田地下水补给过程变化特征[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 89-95. XIA Chaofan, HONG Dalin, HE Yupu, et al. The Impact of the Alternate Dry and Wet in Controlled Irrigation on Capillary Rise in Paddy Fields [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5): 89-95.

0引言

水稻是我国的主要粮食作物,稻田灌溉用水量大 [1], 占农业用水量 65%以上^[2],稻田灌溉用水的节水 潜力巨大,因此,稻田高效水管理技术成为了目前研 究的热点问题^[3-5]。国内外学者开展了旱田地下水补 给变化特征的研究,结果表明,旱田地下水补给过程 明显,已成为补充旱作物需水及根系层土壤水消耗的 重要来源[6-8]。陈建耀等[9]通过开展大型蒸渗仪试验指 出;在地下水浅埋类型地区,地下水补给量对作物蒸 散的贡献明显。Soppe 等^[10]研究表明,砂性土壤地下 水埋深在 1.5 m 时, 地下水补给量可以占到红花每日 耗水量的40.0%。刘战东等[11]研究表明,在地下水位 埋深低于 0.4 m 时, 地下水补水量已基本满足夏玉米 耗水量,种植过程中无须灌溉。Kahlowm等⁶⁰研究表 明,当地下水埋深 0.5 m 时,地下水补给量完全满足 小麦的需水要求。我国稻作区地下水埋深普遍较小, 随着稻田高效水管理技术的应用,节水灌溉模式下稻 田出现了连续的干湿循环过程,稻田无水层时土壤水 分状况与旱田类似,稻田地下水将通过毛管上升作用 不断地补充至水稻根系层。然而,以往研究较少关注 节水灌溉稻田地下水补给过程,干湿循环作用下稻田 地下水补给对于水稻需水及土壤水分布的影响尚不 明确。因此,为充分挖掘水稻生产中的节水潜力,科 学调控干湿循环中稻田地下水补给过程对水稻需水 及土壤水分补充的贡献作用,本文通过定地下水埋深 的蒸渗仪试验,研究节水灌溉稻田地下水补给特征及 其影响,以期为优化稻田水管理策略提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验区简介

本试验在南京水利科学研究院水文水资源与水 利工程国家重点实验室昆山排灌试验基地开展 (31°15′50″N,120°57′43″E)。试验基地属亚热带南 部季风气候区,多年平均气温 15.5 ℃,多年平均降 雨量1097.1 mm,多年平均蒸发量1365.9 mm,多年 平均日照时间2085.9 h,多年平均无霜期234 d。当 地习惯稻麦轮作,土壤为潴育型黄泥土,耕层土壤为 重壤土,土壤有机质量21.88 g/kg,全氮量1.08 g/kg, 全磷量1.35 g/kg,全钾量20.86 g/kg,pH值6.8,耕 层土壤体积质量1.24 g/cm³。试区0~20、0~30 cm与 0~40 cm 深度土壤饱和体积含水率分别为50.0%、48.1% 与45.9%。

收稿日期: 2019-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609141);南京水利科学研究院中 央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y918004, Y919016) 作者简介: 夏超凡(1996-),男。硕士研究生,主要从事农田高效灌溉排 水理论研究。E-mail: xiachaofan@outlook.com

通信作者:和玉璞(1987-),男。博士,主要从事农田高效灌溉排水理论 与环境效应研究。E-mail: heyupu28@163.com

3日-10月20日。

1.2 试验设计

试验共设置 2 个处理,控制灌溉(记为 CI, Controlled irrigation)和浅湿灌溉(记为 FI, Flooding irrigation),每个处理 3 个重复,共计 2×3=6 个小区。 每个小区面积为 0.39 m² (65 cm×60 cm),深度为 90 cm,小区底部与外界隔绝。试验时间为 2017 年 7 月 浅湿灌溉与控制灌溉田间水层控制指标如表 1、 表 2 所示^[12]。各处理供试水稻品种为南粳 46,2017 年 7 月 2 日插秧,每个蒸渗仪小区 4 穴,每穴定 2~3 苗,10 月 20 日收割。各处理稻田施肥、用药、植保 措施保持一致,均为当地农民习惯。

Table 1 Standing water depth thresholds for flooding irrigation										
生育期 Growing stage	返青期 Re-greening stage	分蘖期 Tillering stage			拔节孕穗期 Jointing and booting stages		抽穗开花期 Heading and	乳熟期	黄熟期	
		前期	中期	后期	前期	后期	flowering stages	Milk stage	Ripening stage	
灌水上限/mm Upper limit	50	50	30	30	50	50	50	30	白ெ游工	
灌水下限/mm Lower limit	30	30	15	$60\%\theta_{s1}$	30	30	30	15	日杰奋士	

表1 水稻浅湿灌溉各生育期阶段田间水层控制指标 Table 1 Standing water depth thresholds for flooding irrigation

注 θ_s为根系观测层土壤体积饱和含水率, θ_{sl}为 0~20 cm 深度土壤饱和含水率。

Note θ_s is the soil saturated water content of root observation layer, θ_{s1} is the soil saturated water content of 0~20 cm depth.

6									
生育期 Growing stage	返青期 Re-greening stage	分蘖期 Tillering stage			拔节孕穗期 Jointing and booting stages		抽穗开花期 Heading and	乳熟期	黄熟期
		前期	中期	后期	前期	后期	flowering stages	Milk stage	Ripening stage
灌水上限/mm Upper limit	25	$100\% \theta_{s1}$	$100\%\theta_{s1}$	$100\%\theta_{s1}$	$100\%\theta_{s2}$	$100\%\theta_{s2}$	$100\%\theta_{s3}$	$100\%\theta_{s3}$	
灌水下限/mm Lower limit	5	$70\% heta_{s1}$	$65\%\theta_{s1}$	$60\% heta_{s1}$	$70\% heta_{ m s2}$	$75\% heta_{ m s2}$	$80\% heta_{s3}$	$70\% heta_{s3}$	自然落干
根层观测深度/cm Depth	-	0~20	0~20	0~20	0~30	0~30	0~40	0~40	

Table 2 Soil moisture thresholds in different stages for controlled irrigation

表 2 水稻控制灌溉各生育期阶段根层土壤水分控制指标

注 返青期水层为田间水层深度 (mm)。 θ_s 为根系观测层土壤体积饱和含水率, θ_{s1} 、 θ_{s2} 和 θ_{s3} 分别为 0~20、0~30 cm 和 0~40 cm 深度土壤饱和含水率。 Note The water layer of Re-greening stage is the field water depth. θ_s is the soil saturated water content of root observation layer, θ_{s1} , θ_{s2} , θ_{s3} is the soil saturated water content of 0~20 cm, 0~30 cm & 0~40 cm depth respectively.

1.3 试验布置

试验在配套稻田渗漏水量、地下水补给量自动测 量系统的蒸渗仪中开展(图 1)。蒸渗仪小区底部布 置有透水管,在透水管远离观测池的一端连接气压调 节管(PVC管)至田表,用以调节蒸渗仪小区透水管 处的气压与大气压保持一致。蒸渗仪小区的透水管在 通过 Y 型过滤管后与布设在观测池中的马氏瓶系统 (定位水箱、补水箱)连接。定位水箱溢流口的高程 与稻田地下水位保持一致,本研究中依据区域地下水 位将定位水箱溢流口固定设置在田面下 0.5 m。调节 补水箱通气管底端的高程与补水箱溢流口一致, 根据 马氏瓶的工作原理, 当稻田地下水位下降导致定位水 箱水位下降后,补水箱将向定位水箱及蒸渗仪小区补 水,至稻田地下水位上升至定位水箱溢流口后停止补 水过程。降雨或稻田灌溉后,蒸渗仪小区地下水位升 高,当超出定位水箱溢流面后,多余水量直接溢出并 经由 PVC 软管排至自动翻斗计,此部分水量即为稻 田渗漏水量,通过自动翻斗计测量;当稻田地下水位 降至设定值以下时,根据马氏瓶的工作原理,补水箱 通过定位水箱向蒸渗仪小区补水,补水量即为稻田地 下水补给量,由布置在补水箱内的水位计测量补水前 后的水位差值计算得出补水量。蒸渗仪小区排水通过 布置在观测池底部的直流潜水泵抽排至田面。





1.4 试验观测方法

控制灌溉小区深度内每10 cm 埋设土壤含水率传 感器(S-SMD-M005,美国 Onset),配套2个数据采 集器(U30-NRC-000-10-S100-000, 美国 Onset), 自 动监测稻田的剖面含水率动态变化过程。稻田出现无 水层状态时,为方便判断是否需要灌水,利用 Trease 系统(6050X3, 美国 SEC)于每天 08:00 观测水稻根 系层土壤含水率,观测深度根据各个生育阶段的土壤 水分控制土层深度来确定。浅湿灌溉稻田每天 08:00 通过竖尺在固定观测点测量并记录水层读数。灌水时 每个蒸渗仪单独灌溉,在达到各自处理要求时停止灌 溉,通过量筒记录灌溉水量。利用试验研究基地安装 的自动监测气象站(WS-STD1,英国)测定降雨量。 利用蒸渗仪补水箱内布置的水位传感器(Odyssey, 新西兰)监测补水箱水位变化,计算稻田地下水补给 量,水位传感器直接测量精度 0.8 mm,通过本试验 装置换算后测量精度0.04 mm。利用观测的灌溉水量、 渗漏量、降雨量、土壤水分等要素,通过田间水量平 衡公式计算水稻蒸发蒸腾量(Evapotranspiration, ET)。

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 整理和计算数据,图表 采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2017 绘制,应用 SPSS Statistics20 对数据进行 *t* 检验,显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式稻季地下水补给变化过程

控制灌溉模式显著改变稻田地下水补给变化过程(图 2)。CI 处理稻田地下水补给量受灌水和降雨的影响在稻季不断波动,当稻田干湿循环过程中土壤水分降至一定限度时,稻田地下水补给量在复水后(灌水或降雨)1d内出现峰值,稻季共出现16次峰值,集中在分蘖期、乳熟期和黄熟期。稻季由灌水引起的地下水补给峰值的次数和补给量普遍高于由降雨引起的峰值。FI 处理稻田长期保留薄水层,稻季的大部分时段均以田面水、土壤水入渗补给地下水为主,稻季无明显地下水补给过程发生。





选取典型时段 8 月 30 日一9 月 8 日(水稻移栽 后 59~68 d), 进行灌溉及降雨对控制灌溉稻田地下水 补给量的影响分析。8月30日—9月1日无灌水和降 雨,稻田深层土壤水分通过毛管上升作用间接补给表 土因蒸发作用造成的水分缺失[13-14],稻田地下水补给 量分别为1.09、1.09、1.91 mm, 9月2日有微弱降雨 0.2 mm,此时稻田地下水补给量为1.55 mm,9月3 日在土壤含水率降至灌水下限后稻田, 灌水 41 mm, 表土蒸发强度随之增强[15-16],蒸发作用加剧了地下水 沿毛管向上运移对浅层土壤水分的间接补给作用 [17-18],在表层土壤蒸发增强和毛管力的双重作用下, 稻田地下水补给量在9月3日出现峰值22.88 mm。9 月4日-5日无灌水与降雨,稻田地下水补给量较之 前大幅下降,分别为1.42 mm 和0.35 mm,9月6日 降雨 6.1 mm, 降雨后 1 d 内地下水补给量上升至 1.74 mm,之后地下水补给量迅速降至 0.07 mm。

控制灌溉模式显著增加稻田稻季地下水补给量 和地下水补给强度(图2)。CI处理和FI处理稻田稻 季地下水补给量分别为 253.98 mm 和 9.33 mm, CI 处理稻田地下水补给量较 FI 处理显著增加 244.65 mm(p<0.05);地下水补给强度均值分别为 2.31 mm/d 和 0.08 mm/d, CI 处理稻田地下水补给强度是 FI 处理 的 28.9 倍。



2.2 不同灌溉方式稻田地下水补给变化过程

控制灌溉模式显著增加水稻各生育阶段稻田地 下水补给量(图 3)。水稻分蘖前期、分蘖中期、分 蘖后期、拔节前期、拔节后期、抽穗开花期、乳熟期 和黄熟期的 CI 处理地下水补给量分别是 FI 处理的 64.5、13.7、27.2、29.2、55.9、59.9、23.9 和 32.5 倍。 水稻分蘖中后期的晒田和生育末期田面自由落干使 得 FI 处理稻田地下水补给量有所上升,但仍远小于 CI 处理稻田。图中同时期内标注字母相同表示各处 理间无显著性差异(*p*>0.05)。

2.3 控制灌溉稻田地下水补给对水稻需水的贡献

控制灌溉稻田地下水补给有效补充了水稻需水

(表 3)。除返青期和黄熟期,CI处理稻田稻季地下水补给量约占水稻蒸发蒸腾量(Evapotranspiration, ET)的51.1%,地下水补给量成了水稻蒸发蒸腾量的 重要来源。水稻分蘖前期和抽穗开花期ET较小,地 下水补给量分别约占ET的83.9%和68.0%,时段内 稻田地下水补给量基本能够满足该生育阶段水稻生 长需求。分蘖中期、后期和拔节前期稻田地下水补给 量与ET的占比分别为38.6%、32.5%和27.7%,此阶 段正是水稻需水高峰期,地下水补给可以作为水稻需 水的有效补充。拔节后期和乳熟期稻田地下水补给量 均占ET的100%,已经能完全满足水稻需水要求, 水稻无须额外进行灌溉。

表 3 地下水补给量与水稻蒸发蒸腾量

			Table 3	Capillary rise and pac	mm			
生育阶段 Growing stage	分蘖期 Tillering stage			拔节孕穗期 Jointing	and booting stages	抽穗开花期	乳熟期	
	前期	中期	后期	前期	后期	Heading and flowering stages	Milk stage	合计 Total
地下水补给量	34.17	56.12	28.05	21.60	33.55	35.93	28.64	238.06
Capillary rise								
水稻蒸发蒸腾量	40.73	145.50	86 44	77.85	33.55	52.85	28.64	465.56
Evapotranspiration			00.44					
百分比/%	83.9	3.9 38.6	32.5	27.7	100.0	68.0	100.0	51.1
Percentage			52.5	21.1			100.0	51.1

2.4 控制灌溉稻田地下水补给对土壤水分剖面分布的 影响

地下水浅埋深条件下,稻田地下水补给作用直接 影响根系层土壤水分的剖面分布特征(图 4)。7 月 28 日—8 月 3 日, CI 处理稻田在灌水和降雨的作用 下出现 2 次连续的干湿循环过程。7 月 28 日灌水 39.7 mm 使得 0~30 cm 深度土壤含水率达到饱和,之后在 水稻蒸发蒸腾作用下呈下降趋势;7 月 30—31 日降 雨 9.2 mm,使得 0~30 cm 深度土壤含水率稍有上升, 随后随时间进程再次下降。





CI 处理稻田干湿循环过程中,0~30 cm 深度土壤 含水率受到了降雨和灌水的显著影响,且随干湿循环 进程呈下降趋势,而 30 cm 深度以下土壤含水率在干 湿循环中基本保持稳定。7月23日-8月3日,稻田 地下水补给量累计为 48.80 mm,占水稻蒸发蒸腾量 (60.70 mm)的 80.4%,稻田地下水补给量有效弥补 了土壤水分消耗量,使得 30 cm 深度以下的土壤含水 率保持稳定。而水稻蒸发蒸腾作用主要影响 0~30 cm 深度的土壤水分,同时地下水通过下层土壤对 0~30 cm 深度土壤水分的补给量较小,导致 0~30 cm 深度 土壤含水率总体呈下降趋势。

3 讨 论

控制灌溉模式下,稻田出现了较为明显的地下水 补给过程。CI 处理稻田连续的干湿循环过程使得土 壤含水率在较长时段内维持在田间持水率以下,此时 稻田土壤水分状态与旱地较为一致,土壤剖面形成单 一蒸发型水势分布[19],在毛细管作用下稻田地下水大 量转化为土壤水^[14]。国内外学者在旱田水分循环研究 中发现旱田存在明显的地下水补给过程,与本试验控 制灌溉稻田地下水补给量的驱动机制一致。但受作物 种类、灌溉降雨量等条件影响,控制灌溉稻田地下水 补给量与旱田地下水补给量存在一定差别。杨玉峥等 [20]研究表明,变水位条件下冬小麦全生育期内地下水 补给量为 266.9 mm, 大于本试验 CI 处理稻田。这是 由于杨玉峥等开展的冬小麦试验中降雨量与灌水量 均明显少于本试验 CI 处理稻田,加之冬小麦水分管 理特点,使得旱田土壤水分在生长季大部分时段内小 于田间持水率,有力促进了地下水补给过程,最终使 得冬小麦地下水补给量大于本试验 CI 处理稻田。

灌水和降雨影响地下水补给过程, 当控制灌溉稻 田干湿循环过程中土壤水分降至一定限度时,稻田地 下水补给量在复水后(灌水或降雨)1d内出现峰值。 灌水或降雨后表土蒸发强度迅速增强是稻田地下水 补给量出现峰值的主要原因。龙桃等[18]将土壤划分为 3 个典型剖面层次, 地下水通过中层(水分传输层) 补给浅层 (直接蒸发层)土壤蒸发消耗的水分,刘学 智^[15]、赵红光^[16]、刘战东等^[21]等研究均表明灌水或 降雨后土壤蒸发强度迅速增大,这种蒸发高峰会维持 1 d 至数天,在蒸发的作用下,浅层土壤基质势逐渐 降低,深层土壤水分克服重力在基质吸力的作用下沿 毛管向上运移^[17],浅层土壤蒸发量越大,地下水通过 水分传输层对直接蒸发层的补给量越多[18],因此稻田 地下水补给量在复水后(灌水或降雨)1 d 内会出现 峰值。稻季内稻田地下水补给量峰值的大小和次数受 复水量和复水时土壤初始含水率影响,复水强度大且 土壤初始含水率低时,稻田地下水补给量峰值更高。 由于灌水多发生在土壤含水率降至灌水下限时,且一 次灌水强度均大于降雨强度,所以稻季由灌水引起的 稻田地下水补给峰值的次数和补给量普遍高于降雨 引起的峰值。

控制灌溉稻田地下水补给是水稻需水的重要来源, 与旱田己有研究结果一致,但控制灌溉稻田地下水补 给对作物需水贡献小于旱田。Kahlown 等^[6]研究结果 表明,地下水埋深 0.5 m 时,农田地下水补给量完全 满足小麦的需水要求。刘战东等^[11]利用地中渗透仪试 验,指出在地下水位埋深低于 0.4 m 时,地下水补水 量已基本满足夏玉米耗水量。本试验中 CI 处理稻田地 下水补给量与冬小麦地下水补给量接近,小于夏玉米 地下水补给量,但水稻的蒸发蒸腾量远大于冬小麦和 夏玉米,正是作物需水特征的差异使稻田地下水补给 量对水稻需水的调节作用弱于旱田的研究结果。

控制灌溉稻田地下水补给影响作物根区土壤水 分变化。稻田地下水在土水势梯度作用下不断向上运 动,弥补腾发作用消耗的土壤水分。尤其是在浅地下 水埋深条件下,稻田地下水补给显著影响一定深度以 下土层的土壤水消耗,使其土壤含水率保持稳定,而 表层土壤水分在降雨、灌溉、地下水补给和蒸发蒸腾 作用下出现明显波动。该结论与杨建锋等^[22]在冬小麦 农田的试验结论较为一致,其结果表明旱地地下水补 给作用下,50 cm 深度以下的土壤水分保持稳定,0~50 cm 深度土壤水分在腾发作用下不断减小。

由于本试验未隔绝降雨,稻季地下水补给过程受 灌水和降雨共同影响,因此无法进一步单独分析灌水 或降雨对地下水补给的影响。今后研究中将考虑增加 一组隔绝降雨的蒸渗仪小区,对比分析有无降雨条件 下地下水补给量的差别,同时应用 Hydrus-1d 进行模 拟分析,以更好地阐明节水灌溉模式稻田地下水补给 特征及其影响因素。

4 结 论

1)控制灌溉模式改变了稻田地下水补给变化过程,显著增加稻季稻田地下水补给量。当稻田干湿循环过程中土壤水分降至一定限度时,稻田地下水补给量在复水后(灌水或降雨)1 d内出现峰值,稻季共出现16次峰值,累积稻田地下水补给量为253.98 mm。

2)控制灌溉稻田地下水补给是水稻需水的重要补给源。水稻需水高峰期稻田地下水补给量约占水稻 作物需水量的51.1%,且不同生育阶段稻田地下水补 给量对于作物需水的调节作用差别较大,水稻分蘖前 期、拔节后期和乳熟期稻田地下水补给对于水稻需水 的贡献较大。

3)浅地下水埋深条件下,地下水补给作用直接 影响水稻根区土壤水分剖面分布特征。控制灌溉处理 稻田干湿循环过程中,0~30 cm 深度土壤含水率受到 了降雨和灌水的显著影响,且随干湿循环进程呈下降 趋势,30 cm 深度以下土壤含水率在稻田地下水补给 作用下基本保持稳定。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2018 年中国水资源公报[M]. 北京: 水利水
 电出版社, 2018.

Ministry of Water Resources of the PRC. China Water Resources Bulle-tin[M]. Beijing: Water conservancy and Hydropower Press, 2018.

[2] 程建平.水稻节水栽培生理生态基础及节水灌溉技术研究[D].武汉:华中农业大学, 2007.

CHENG Jianping. Study on Foundation of Physi-ecology and Technique of Water-saving Irrigation for Rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007.

[3] 索滢,王忠静.典型节水灌溉技术综合性能评价研究[J].灌溉排水 学报,2018,37(11):113-120.

SUO Ying, WANG Zhongjing. Systematically evaluating the performance of typical water-saving irrigation techniques[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 113-120.

- [4] 许怡, 吴永祥, 王高旭, 等. 小区和田块尺度下水稻不同灌溉模式的 节水减污效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 60-66. XU Yi, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Impact of irrigation methods on saving water and alleviating pollutant at different scales in paddy field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 60-66.
- [5] 许怡, 吴永祥, 王高旭, 等. 稻田不同灌溉模式的节水减污效应分析: 以浙江平湖为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 56-62.
 XU Yi, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Efficacy of different irrigation methods in saving water and ameliorating pollution in paddy field: Take Pinghu as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 56-62.
- [6] KAHLOWM M A, ASHRAF M, ZIA-UL-HAQ. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields[J]. Agri-cultural Water Management, 2005, 76(1): 24-35.
- [7] SEPASKHAH A R, KARIMI-GOGHARI S H. Shallow groundwater con-tribution to pistachio water use[J]. Agricultural Water Management, 2004, 72(1): 69-80.
- [8] TALEBNEJAD R, SEPASKHAH A R. Effect of different saline groundwater depths and irrigation water salinities on yield and water use of quinoa in lysimeter[J]. Agricultural Water Management, 2015, 148: 177-188.
- [9] 陈建耀, 吴凯. 利用大型蒸渗仪分析潜水蒸发对农田蒸散量的影响
 [J]. 地理学报, 1997, 52(5): 439-446.
 CHEN Jianyao, WU Kai. The impacts of ground water on evapotranspiration by using lysimeter[J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(5): 439-446.
- [10] SOPPE R W O, AYARS J E. Characterizing ground water use by safflower using weighing lysimeters[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(1): 59-71.
- [11] 刘战东,刘祖贵,俞建河,等.地下水埋深对玉米生长发育及水分利

用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 617-624.

LIU Zhandong, LIU Zugui, YU Jianhe, et al. Effects of groundwater depth on maize growth and water use efficiency[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 617-624.

[12] 彭世彰, 俞双恩, 张汉松. 水稻节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利 水电出版社, 1998: 18-45.

PENG Shizhang, YU Shuangen, ZHANG Hansong. Water saving irrigation technology of rice[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1998:18-45.

- [13] 王锐, 孙西欢, 郭向红, 等. 不同入渗水头条件下土壤水分运动数值 模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 45-49.
 WANG Rui, SUN Xihuan, GUO Xianghong, et al. Numerical simulation for soil water movement at different infiltration heads[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 45-49.
- [14] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.多因素影响下土壤上升毛管水运动特性 HYDRUS 模拟及验证[J].农业工程学报,2018,34(5):83-89.
 ZHONG Yun, FEI Liangjun, FU Yuliang, et al. HYDRUS simulation and verification of movement characteristics of upward capillary water flow in soil as affected by multi-factor[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 83-89.
- [15] 刘学智. 宁夏中部干旱带降雨和砂土混合覆盖对压砂地土壤水分蒸 发的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
 LIU Xuezhi. Effects of rainfall and gravel-soil covered on soil water evaporation in gavel-mulched land of Ningxia central arid region[D].
 Yinchuan: Ningxia University, 2018.
- [16] 赵红光. 自然和人工条件下作物蒸发蒸腾量(ET)的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.

ZHAO Hongguang. Research of crop evapotranspiration (*ET*) under natural and artificial conditions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

- [17] 包含,侯立柱,刘江涛,等.室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再 分布试验[J].农业工程学报,2011,27(7):70-75.
 BAO Han, HOU Lizhu, LIU Jiangtao, et al. Experiment on process of soil water infiltration and redistribution under simulated rainfall[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 70-75.
- [18] 龙桃, 熊黑钢, 张建兵, 等. 不同降雨强度下的草地土壤蒸发试验
 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 240-245.
 LONG Tao, XIONG Heigang, ZHANG Jianbing, et al. Experimental study on grassland soil evaporation with different rainfall intensity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 240-245.
- [19] 韩双平, 荆恩春, 王新忠, 等. 种植条件下土壤水与地下水相互转化研究[J]. 水文, 2005, 25(2): 9-14.
 HAN Shuangping, JING Enchun, WANG Xinzhong, et al. Transformation between soil water and groundwater under the condition of

planting[J]. Hydrology, 2005, 25(2): 9-14.

94

[20] 杨玉峥,林青,王松禄,等.大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转 化关系研究[J].土壤学报,2015,52(3):547-557.
YANG Yuzheng, LIN Qing, WANG Songlu, et al. Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the dagu river[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 547-557.

 [21] 刘战东,秦安振,宁东峰,等.降雨级别对农田蒸发和土壤水再分布 的影响模拟[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 1-8.
 LIU Zhandong, QIN Anzhen, NING Dongfeng, et al. Effective of simulated different rainfall intensities on soil evaporation and water redistribution in crop field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(8): 1-8.

[22] 杨建锋,刘士平,张道宽,等.地下水浅埋条件下土壤水动态变化规 律研究[J]. 灌溉排水,2001,20(3):25-28.
YANG Jianfeng, LIU Shiping, ZHANG Daokuan, et al. Study on the water movement in soil with shallow water table[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(3): 25-28.

The Impact of the Alternate Dry and Wet in Controlled Irrigation on Capillary Rise in Paddy Fields

XIA Chaofan, HONG Dalin, HE Yupu^{*}, JI Renjing, RUI Xuqian (State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this paper is to investigate experimentally the change in capillary rise and groundwater recharge in response to alternate dry and wet associated with controlled irrigation in paddy fields. [Method] The experiment was conducted in lysimeters with the depth of groundwater table kept at 0.5 m. During the experiment, we measured the change in groundwater recharge and soil moisture distribution, which was used to calculate evapotranspiration and capillary rise. [Result] Groundwater recharge peaked one day after irrigation or precipitation when soil moisture dropped to lowest level during a dry-wet cycle. The measured temporal change in groundwater recharge had multiple peaks during the growth season. The overall recharge was 253.98 mm, increasing by 244.65 mm compared the 9.33 mm recharge under flooding irrigation. About 51.1% of the evapotranspiration under controlled irrigation was due to the capillary rise from the groundwater. The soil moisture in depth below 30cm remained almost constant during the experiment due to the capillary rise from the groundwater, while the soil moisture in top 0~30 cm soil layer decreased as time elapsed. [Conclusion] Controlled irrigation increased capillary rise from groundwater in paddy field significantly, compared with flooding irrigation. More than half of the evapotranspiration under controlled irrigation originated from groundwater due to the increased capillary rise. The results presented in this paper are helpful for optimizing water management in paddy fields. **Key words:** water-saving irrigation; paddy field; capillary rise; dry-wet alternation

责任编辑: 白芳芳