

南方丘陵灌区水田-塘堰-沟道系统水循环特征及 回归水重复利用规律分析

邵培寅¹, 熊玉江², 袁念念², 彭正艺¹, 李亚龙^{2*}, 苏沛兰¹,
魏广飞³, 叶磊⁴, 林晓炜⁵

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 长江水利委员会长江科学院农业水利研究所, 武汉 430010;
3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 4. 湖北省漳河工程管理局, 荆门 448156; 5. 江苏省科佳工
程设计有限公司, 无锡 214000)

摘要: 南方丘陵灌区因其地势起伏、塘堰众多, 为农田灌溉储水、用水提供了便利, 导致灌区水循环路径复杂、不同系统水量交换不清晰、回归水重复利用无法定量计算。为了探明灌区水循环规律, 通过 2 a (2021—2022 年) 现场观测试验, 对水田、塘堰和沟道分别构建水量平衡模型, 提出“首尾比较法”来复核田间灌溉水量, 区分了回归水重复利用的发生场所, 分生育期评价水循环规律和回归水重复利用程度。结果表明, 通过水田水量平衡公式并结合 DRAINMOD 模型计算的田间灌水量, 2 a 的结果与塘堰、沟道和渠道灌溉实测值之和的相对误差分别 4.65% 和 -2.74%, 表明“首尾比较法”复核灌溉水量较为可靠。在田间灌溉水不同来源中, 渠道直灌、沟道、塘堰分别占 9.77%、71.81% 和 18.42%。由于灌溉需求, 整个生育期塘堰消耗了 82.73% 的初始蓄水量, 渠道补给、降雨、沟道来水分别补充了 38.15%、29.98% 和 14.60%。塘堰回归水重复利用率全生育期呈逐渐减小的趋势, 沟道是回归水重复利用的主要场所, 且回归水重复利用率是塘堰的 2 倍 (80.86%)。渠道灌溉水初次分配仅有 29.44% 进入田间, 但是塘堰和沟道二次分配使得至少 72.10% 的渠道水进入田间。南方丘陵灌区塘堰和沟道水循环受人类活动影响严重。灌区管理者“补给塘堰为主、直灌田间为辅”的灌溉策略符合农民需求、实际灌溉效率较高。

关键词: 排水; 灌溉; 水循环; 水量平衡; 南方丘陵灌区; 回归水重复利用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302174

中图分类号: P339; S27

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-11-0106-12

邵培寅, 熊玉江, 袁念念, 等. 南方丘陵灌区水田-塘堰-沟道系统水循环特征及回归水重复利用规律分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 106-117. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302174 <http://www.tcsae.org>
SHAO Peiyin, XIONG Yujiang, YUAN Niannian, et al. Hydrological cycle for Paddy-Ponds-Ditches system and reuse of return flow in Southern hilly irrigated areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 106-117. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302174 <http://www.tcsae.org>

0 引言

由于人类活动对水分循环的影响, 灌区呈现出与天然流域不同的水文特征^[1]。灌区内的田埂、塘堰等蓄水设施和灌排渠系等输水设施改变了灌区自然的水文过程, 灌溉水源和灌溉方式的多样化、灌区回归水的重复利用等进一步使灌区水文循环复杂化。

前人对此进行了大量的试验^[2]与数值模拟研究^[3-4], 促进了对灌区水分运移转化^[5]、水循环特征^[6-7]的认识。南方丘陵灌区因其独特地势, 大小塘堰众多, 除了调蓄径流外, 塘堰还承接渠道灌溉水作为附近农田的灌溉水源^[8]。亚热带季风气候导致降雨时空分布不均, 沟道拦蓄田间排

水用于灌溉的现象普遍。因此, 南方丘陵灌区具有多水源灌溉和回归水重复利用两大特点, 其水循环过程也与其他灌区有较大差别。水利部印发《“十四五”水安全保障规划》中提出, 要推动完善输配水系统建设, 着力提高灌区输配水效率, 对于灌区灌溉用水的准确计量提出了更严格的要求。南方丘陵灌区存在多种灌溉水源和复杂的回归水重复利用^[9], 灌溉水量的计算更加复杂。SHAO 等^[10-11]利用多层水箱模型和系统动力学来模拟塘堰对灌区的调蓄作用; DAI 等^[12-13]通过 SWAT 模型评估了水管理措施对水分生产率和节水潜力的影响; 于颖等^[14]建立调蓄排水和灌溉需水的水平衡演算模型, 认为提高灌排面积比能明显提高排水再利用率。然而, 以上研究对于受人类活动影响的塘堰和沟道蓄用水行为研究不够深入, 且均以年为周期, 缺乏考虑不同生育期的灌区水循环特征比较方法。因此, 本研究基于现场原位水量观测试验, 将水田、塘堰和沟道概化成独立的系统, 针对各自的水循环特点构建水量平衡公式, 分生育期探究各系统水循环特征和灌区回归水重复利用规律, 厘清渠道灌溉水在研究区的耗散路径, 同时提出一种多水源灌区灌水量计算及复核的方法, 以期灌区精细水量管理提供指导。

收稿日期: 2023-02-28 修订日期: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金委员会-水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金项目 (U2040213); 清华大学联合开放基金项目 (sklhse-2022-low09); 山西省基础研究计划项目 (20210302124249、20210302124370)

作者简介: 邵培寅, 研究方向为灌溉水文学。Email: 1137263554@qq.com
※通信作者: 李亚龙, 博士, 正高级工程师, 研究方向为农村水利。Email: lyalong888@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

漳河灌区是湖北省最大的灌区，设计灌溉面积 17.37 万 hm²，是全国九大粮食产区之一。灌区地形主要为丘陵与平原结合区，北高南低，其自然条件在南方丘陵地区具有一定的代表性。目前，漳河灌区已形成以漳河水库为骨干，以中、小型水库和塘堰相结合的综合型水利工程。灌区地势起伏，塘堰和沟道互相混合交错^[15]。灌区塘堰上下游各有沟道相连，用于集水和排水，塘堰被用来收集雨水、上游沟道来水及灌溉水以供农田灌溉。当地农民也经常 在沟道中放置土包，或在排水涵管出口盖 上木板，拦蓄沟道中的田间排水以供灌溉^[16]。

在漳河灌区内的杨树岗流域选取一个相对封闭的斗渠尺度区域进行研究，位于荆门市团林镇铺白鹤村，漳河灌区三干渠九家湾管理段南 1.0 km 处。研究区总面积为 1.16 km²，水田占比 80.3%，塘堰占比 13.3%，沟道占比 2.5%，建筑物占比 3.9%。研究区北高南低，北边界为三干渠，东西边界为乡镇水泥道路，研究区排水均通过农沟汇入区域中央的斗沟排出。研究区现状及典型点位如图 1 所示。2021—2022 年水稻种植面积占水田的 95%。2021 年由于疫情影响，未监测到泡田期田间蓄水过程，将部分泡田期并入返青期。拔节孕穗期和抽穗开花期的作物系数一致，且这 2 个生育期田间水层深度相同，统一划分成拔节抽穗期。2 a 水稻生育期及作物系数见表 1，其中作物系数来自本地区其他研究^[17]。2021 年和 2022 年水稻生育期时长分别为 116 和 124 d。

表 1 2021 和 2022 年水稻生育期及作物系数

Table 1 Reproductive stages and crop coefficient of rice in 2021 and 2022						
生育期 Reproductive stages	2021		2022		作物系数 Crop coefficient	
	日期 Date	天数 Days/d	日期 Date	天数 Days/d		
泡田期 Soaking	—	—	05-10—05-21	12	1	
返青期 Returning green	05-23—06-11	20	05-22—06-03	13	1	
分蘖前期 Early tillering	06-12—07-11	30	06-04—07-03	30	1.21	
分蘖后期 Late tillering	07-12—07-26	15	07-04—07-19	16	0.79	
拔节抽穗期 Booting and earing	07-27—08-24	29	07-20—08-18	30	1.57	
乳熟期 Milk ripening	08-25—09-04	11	08-19—08-29	11	1.37	
黄熟期 Ripening	09-05—09-15	11	08-30—09-10	12	0.88	

1.2 试验布置及数据采集

1.2.1 田间地下水埋深

在研究区内选取 4 块典型水稻田，在田间打下 1 m 深水 位观测井，并在井底放置压力式传感器，逐小时记录压力，转换成对应田间地下水埋深。

1.2.2 塘堰水位

在研究区内部及周边选取 5 个典型塘堰，在塘堰中打下水位观测井，并在井底放置压力式传感器，逐小时记录压力，转换成对应塘堰水位。

1.2.3 斗沟出口流量

在斗沟出口处设置水位观测井，并在井底放置压力式传感器，逐小时记录压力，转换成对应水位，根据水位流量曲线，计算出口流量。

1.2.4 气象数据监测

研究区雨量通过三干渠管理段及研究区南侧 4 km 处

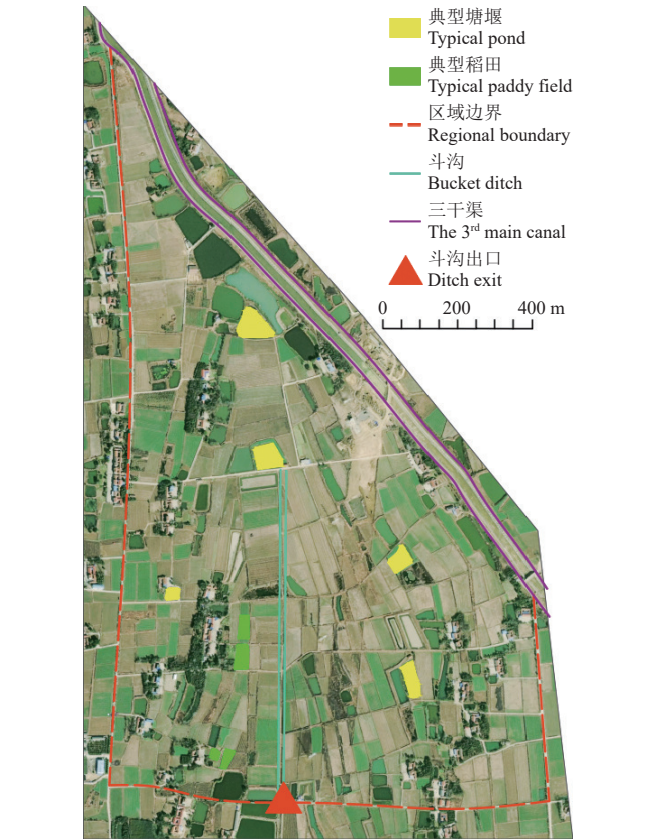


图 1 研究区示意图及典型点位布置

Fig.1 Schematic diagram of the study region and typical point layout

设置的 HOBO RG3 翻斗式自记雨量记录仪差值，记录逐小时雨量。气压和温度通过在田间水位井盖下端绑置传感器，记录逐小时气压和温度。风速、湿度和 E601 蒸发量来自研究区附近的团林灌溉试验站。

1.2.5 渠道灌水数据监测

研究区渠道灌溉水来自三干渠，通过电灌站取水至斗渠渠首。灌区灌溉以补给塘堰为主、直灌田间为辅”。由于不同田块水稻的播种时间和品种存在差异，因此研究区中田块的需水情况不尽相同，为了避免正在晒田或落干的稻田被水浇灌，只有返青期和拔节孕穗期中的 2~3 d 渠道灌溉水能直灌田间，其余时间均直接补充塘堰，再由农民自行从塘堰抽灌。从三干渠管理段获取灌溉水量、对象以及时期（表 2）。2021 年仅拔节孕穗期存在渠道灌水，而 2022 年返青期和拔节孕穗期均存在渠道灌水。

表 2 2021 年和 2022 年研究区灌溉情况
Table 2 Irrigation in the study region in 2021 and 2022

年份 Year	灌溉期 Irrigation time	灌溉对象 Irrigation objects	灌溉水量 Irrigation amount/m ³
2021	拔节抽穗期	水田、塘堰	77 661
	返青期	水田、塘堰	
	分蘖前期	塘堰	
2022	拔节抽穗期	水田、塘堰	130 590
	乳熟期	塘堰	
	黄熟期	塘堰	

1.3 水量平衡计算

1.3.1 田间系统水量平衡及 DRAINMOD 模型原理

田间水量平衡通过农田水管理 DRAINMOD 模型进行计算, 该模型在水稻灌区的应用较多^[18-19]。田间水量平衡^[18]计算式如下:

$$I_R = \Delta V_R + D_R + E_{TC} + D_S - P_R \quad (1)$$

式中 I_R 为田间灌溉量, m³; ΔV_R 为田间储水量变化, m³, 包括田间不透水层以上土体内的水量变化和土壤表面的水量变化, m³; D_R 为田间排水量, m³, 包括降雨后田面积水超过田埂产生的地表径流和田面以下产生的侧向排水量, m³; E_{TC} 为蒸发蒸腾量, m³; D_S 为田间深层渗漏量, m³; P_R 为降雨量, m³。

将研究区的所有水田概化为一个整体, 即水田系统, 用 4 个典型田块地下水埋深的均值作为研究区水田系统地下水埋深。 ΔV_R 通过田间地下水埋深及研究区土壤参数来计算。 D 通过地表无积水时的 Hooghout 稳定流公式和地表积水时的 Kirkham 公式计算, 需率定侧向饱和和导水率 k ; E_{TC} 通过 Penman-Monteith 公式及对应作物系数 (表 1) 计算; 由于研究区相对不透水层的导水率很小^[20], D_S 可忽略不计。模型输出为水深单位, 基于研究区对应水田面积换算成体积单位。

由模型基本原理可知, 在降雨和灌溉给定的条件下, 影响田间地下水埋深模拟精度的参数^[21]主要有侧向饱和和导水率 k 、田埂高度 S_m 和 Kirkham 积水深度 S_i 。 S_m 已通过现场测量得到, 而本地区之前的 DRAINMOD 模型的应用较多, 土壤、作物等参数均沿用前人研究结果^[22-23], 排水系统参数通过实地测量, 排水沟深、宽和间距分别为 0.5、0.9 和 56 m。本研究仅需轻微调整 k 和 S_i 即可。对于田间灌溉, 只清楚大致时间, 灌溉量未知, 需要反推。因此模型调参分为 2 个阶段: 第一阶段根据灌溉时间结合田间实测水位, 选择不存在灌溉的时间率定出 k 和 S_i , 分别为 3.5 cm/h 和 4 cm。由于研究区水稻田会进行晒田和落干, 不同生育期的田间水位上下限不同, 因此无法使用模型的自动灌溉功能, 为了能更贴近真实的田间水分情况, 第二阶段将假设的灌溉量加入模型输入值中, 根据模拟的地下水埋深和实测田间地下水埋深进行匹配调整, 以此反推田间灌溉量。DRAINMOD 模型一般通过比较地下水埋深这一模拟结果和实际观测结果对模型进行验证和率定, 采用总量相对误差、平均偏差、平均绝对偏差和决定系数^[24]来评价模拟效果。

1.3.2 塘堰系统水量平衡

受人类灌溉活动影响, 塘堰除调蓄径流外, 还承接

渠道灌溉水以供周围农田灌溉, 需要考虑渠道补给量和抽灌量来重新构建塘堰水量平衡计算公式:

$$I_{DP} = \Delta V_P - P_P - I_{CP} + E_{TP} + D_{SP} + I_{PR} \quad (2)$$

式中 I_{DP} 为沟道来水量, 包括地表径流和壤中流, 正值表示沟道水补充塘堰, 负值代表塘堰水补充沟道, m³; ΔV_P 为塘堰的蓄水量变化, m³; P_P 为塘堰降雨量, m³; I_{CP} 为渠道补水量, 渠道灌水补给塘堰的水量, m³; E_{TP} 为塘堰水面蒸发量, m³; D_{SP} 为塘堰渗漏量, m³; I_{PR} 为塘堰抽灌量, 从塘堰抽灌至田间的水量, m³。由于研究区地势起伏, 垂直方向不透水层导水率较小^[25], D_{SP} 通过水平方向壤中流汇入下游沟道。

通过实地调研可知, 研究区共有塘堰 57 口, 总蓄水量 95 575 m³。将研究区所有塘堰概化成为一个大塘堰。根据 5 个典型塘堰的每日蓄水量占各自总蓄水量的比例均值对应研究区塘堰总蓄水量, 即可得塘堰系统每日蓄水量, 塘堰系统每日蓄水量见图 2。

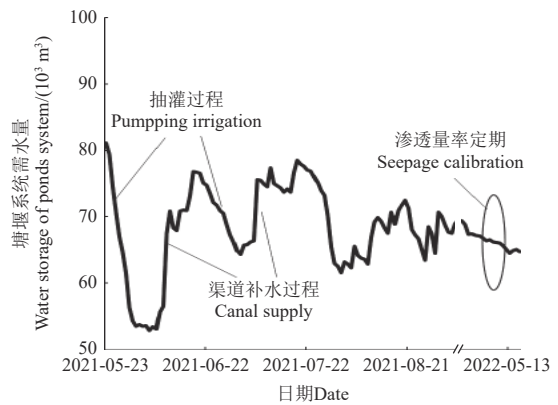


图 2 塘堰系统蓄水量变化

Fig.2 Change of water storage of pond system

P_P 通过降雨量对应研究区塘堰水面面积计算得到; E_{TP} 通过 E601 蒸发量对应研究区塘堰水面面积和本地折算系数^[26]计算得到; D_{SP} 为蓄水量变化反推值, 选取 9 月无降雨、抽灌、渠道补水和沟道来水的时段 (图 2), 各典型塘堰每日库容减少量扣除蒸发量即为渗漏量, 除以各典型塘堰日蓄水量, 可得各典型塘堰渗漏系数^[27], 取平均值即为塘堰系统渗漏系数, 对应塘堰系统的每日蓄水量可得每日渗漏水量。 I_{PR} 和 I_{CP} 通过对 5 个典型塘堰蓄水量反推, 同理可得各次抽灌和渠道补水占各自总蓄水量的比例和塘堰系统的各次的抽灌量和渠道补水量。

1.3.3 沟道系统水量平衡

受人类灌溉活动影响, 沟道拦蓄田间排水用于灌溉的现象普遍, 需要考虑沟道抽灌量来重新构建沟道水量平衡计算式如下:

$$I_{DR} = \Delta V_D + P_D + D_R + D_{SP} + Q_{qs} - E_{TD} - D_B - I_{DP} - D_{SD} \quad (3)$$

式中 I_{DR} 为沟道抽灌量, 从沟道抽灌至田间的水量, m³; ΔV_D 为沟道蓄水量变化量, m³; P_D 为沟道降雨量, m³; Q_{qs} 为渠系损失量, m³; E_{TD} 为沟道水面蒸发量, m³; D_B 为斗沟排出水量, m³; D_{SD} 为沟道深层渗漏量。将研究区的所有沟道概化为一个整体, 即沟道系统。由于沟道

面积仅占研究区 2.5%，平均深度为 0.5 m，蓄水量远低于塘堰，且后续计算分析以生育期为周期，因此 ΔV_D 可忽略不计。 P_D 和 E_{TD} 计算方法与塘堰系统相似。 Q_{qs} 为从斗渠渠首灌入的水量减去进入塘堰和水田的水量，由于研究区较小，渠道长度较短，因此渠道输水时间较短，渠系输水蒸发量忽略不计。由于沟道系统最下级斗沟在 2020 年灌区改造刚经过水泥衬砌翻新，因此 D_{SD} 可忽略不计。

1.4 回归水及其评价指标计算

回归水指灌区在上游因灌溉或降雨产生的地表径流或壤中流被下游塘堰或沟道拦截储蓄以供使用的水量^[28]。回归水重复利用量指回归水中被重复利用的部分。回归水重复利用率即回归水重复利用量与回归水量的比值，是衡量回归水重复利用程度的重要指标。本研究在区分回归水重复利用场所的基础上，将回归水分为塘堰回归水和沟道回归水，分别计算塘堰、沟道和总体回归水重复利用率。

在塘堰水分输入项中，渠道补给来自三干渠，不属于回归水。塘堰回归水为除渠道补给外的输入水量减去在重复利用之前被消耗的水量。塘堰回归水 R_{FP} 计算式如下：

$$R_{FPi} = \frac{P_{Pi} + I_{DPI} - (P_{Pi} + I_{DPI}) / (P_{Pi} + I_{DPI} + I_{CPI} + V_{Pi}) \cdot (E_{Ti} + D_{SPi})}{n_i} \quad (4)$$

$$R_{FPi} = \frac{P_{Pi} - P_{Pi} / (P_{Pi} + I_{CPI} + V_{Pi}) \cdot (E_{Ti} + D_{SPi} - I_{DPI})}{n_i} \quad (5)$$

式中 R_{FPi} 为第 i 个生育期的塘堰回归水量日均值， m^3 ； P_{Pi} 为第 i 个生育期的塘堰降雨总量， m^3 ； I_{DPI} 为第 i 个生育期的沟道来水量， m^3 ； I_{CPI} 为第 i 个生育期的渠道补给量， m^3 ； V_{Pi} 为第 i 个生育期初始的塘堰蓄水量， m^3 ； E_{Ti} 为第 i 个生育期的塘堰蒸发总量， m^3 ； D_{SPi} 为第 i 个生育期的塘堰渗漏总量， m^3 ； n_i 为第 i 个生育期的天数。

塘堰回归水重复利用量指塘堰回归水中用于抽灌的水量，定义为塘堰抽灌量占输出水量的比例乘以回归水量，计算式如下：

$$R_{FPRi} = \frac{I_{PRI}}{I_{PRI} + D_{SPi} + E_{Ti}} \cdot \frac{1}{n_i} \cdot R_{FPi} \quad (6)$$

$$R_{FPRi} = \frac{I_{PRI}}{I_{PRI} + D_{SPi} + E_{Ti} - I_{DPI}} \cdot \frac{1}{n_i} \cdot R_{FPi} \quad (7)$$

式中 R_{FPRi} 为第 i 个生育期的塘堰回归水重复利用量日均值， m^3 ； I_{PRI} 为第 i 个生育期的塘堰抽灌量日均值， m^3 ；

沟道回归水指因降雨或灌溉产生的地表径流或壤中流进入沟道被储蓄以供使用的水量。在沟道的水分通量中，沟道回归水量为输入水量减去重复利用前消耗的水量。沟道回归水 R_{FD} 计算式为：

$$R_{FDi} = \frac{P_{Di} + D_i + D_{SPi} + Q_{qsi} - E_{TDi} - I_{DPI}}{n_i} \quad (8)$$

式中 R_{FDi} 为第 i 个生育期沟道回归水量日均值， m^3 ； P_{Di} 为第 i 个生育期的沟道降雨总量， m^3 ； D_i 为第 i 个生育期的田间排水总量， m^3 ； Q_{qsi} 为第 i 个生育期的渠系损失

量， m^3 ； E_{TDi} 为第 i 个生育期的沟道水蒸发总量；

沟道回归水重复利用量指沟道回归水中被重复利用的部分，定义为沟道抽灌量占输出水量的比例乘以回归水量，计算式如下：

当沟道来水量 $I_{DPI} > 0$ 时，有

$$R_{FDRi} = \frac{I_{DRI}}{I_{DRI} + D_{Bi} + E_{TDi} + I_{DPI}} \cdot \frac{1}{n_i} \cdot R_{FDi} \quad (9)$$

当沟道来水量 $I_{DPI} < 0$ 时，有

$$R_{FDRi} = \frac{I_{DRI}}{I_{DRI} + D_{Bi} + E_{TDi}} \cdot \frac{1}{n_i} \cdot R_{FDi} \quad (10)$$

式中 R_{FDRi} 为第 i 个生育期的塘堰重复利用水量日均值， m^3 ； I_{DRI} 为第 i 个生育期的沟道抽灌总量， m^3 ； D_{Bi} 为第 i 个生育期的沟道排出水量， m^3

2 结果与分析

2.1 水田水量计算结果及分析

2.1.1 DRAINMOD 参数率定及结果

水田系统水量平衡最终模拟结果如图 3 所示，DRAINMOD 模型预测的地下水位埋深变化与实测值进行比较，变化范围与趋势基本一致。但田面积水部分有所偏差，2021 年拔节抽穗期田面积水实测值下降较模拟值更快，可能是农户降低田埂缺口高度主动排水所致。评价指标计算结果（表 3）表明，地下水埋深实测值和模拟值偏差较小，地下水埋深总量的相对误差在 10% 左右，平均偏差绝对值小于 3 cm，模拟实测值相关性较好（ $R^2 > 0.92$ ），表明基于 DRAINMOD 模型的田间水量平衡计算准确。

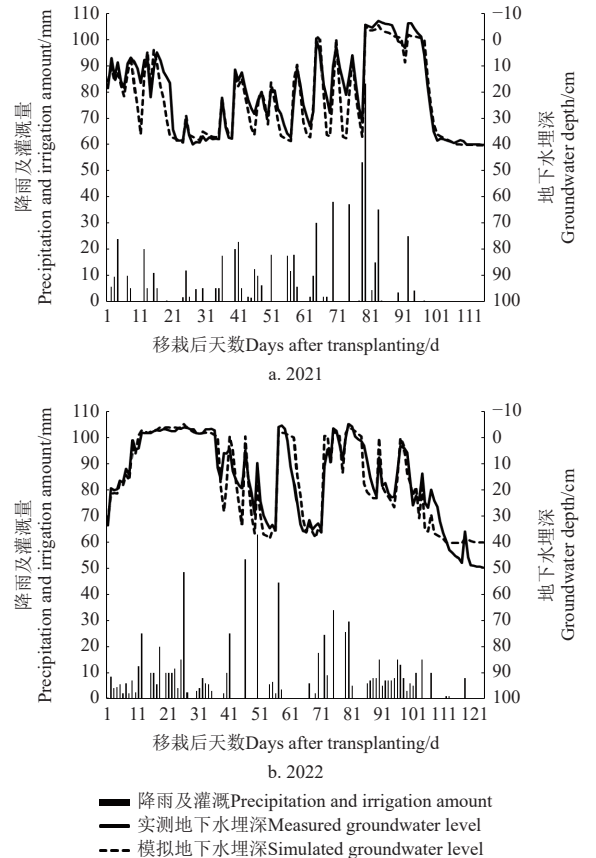


图 3 2021-2022 年田间地下水埋深实测与模拟结果比较
Fig.3 Comparison of simulated and measured field groundwater depth in 2021 and 2022

表 3 DRAINMOD 模型模拟地下水埋深性能评价
Table 3 Performance evaluation of DRAINMOD model for simulation of groundwater depth

年份 Year	相对误差 Relative error/%	平均偏差 Average deviation/cm	平均绝对偏差 Average absolute deviation/cm	决定系数 Determination coefficient
2021	11.8	-2	3.8	0.941
2022	8.3	-1	4.0	0.934

2.1.2 水田系统水分通量比较

由于各生育期天数长短不一, 故本研究按照各生育期日均值进行比较, 日均值通过将各生育期每日水分通量累积除以对应的生育期天数得到。各生育期水田水分通量日均值见表 4, 2021 年分蘖后期的降雨量最大, 拔节抽穗期的灌溉量最大。分蘖后期晒田结束, 拔节抽穗期因为有回灌导致田间水位升高, 加之温度升高, 导致该生育期蒸发蒸腾量最大, 同时因为田间水位增高也导致该生育期排水量增大。从拔节抽穗期到乳熟期再到黄熟期, 蒸发蒸腾量和排水量逐渐降低, 与田间地下水埋深的变化相反。2022 年, 返青期的灌溉量最大。泡田期间, 田间开始灌水, 地下水埋深由高逐渐降低, 田面积水时间较短, 因此排水量在前 4 个生育期最低。分蘖前期降雨量最大, 导致田面积水较多, 且个别降雨较大 (63 mm) 造成地表径流, 因此排水量最大。

将 2021 和 2022 年进行对比, 除返青期外, 各生育期蒸发蒸腾量均高于 2021 年, 系 2022 年温度较高所致。2022 年前 3 个生育期的降雨和灌溉存在较大差距, 2021 年则相对均匀。2022 年拔节抽穗期田面积水深度小于 2021 年, 因此排水量远小于 2021 年, 但蒸发蒸腾量却更大。由全生育期水分通量总量分析可得 (表 5), 2 年的灌溉和蒸发蒸腾量均超过了 50%, 分别为占比最大的输入量和输出量。水田水循环特征以灌溉—蒸发蒸腾的垂向运动为主。

表 4 2021 和 2022 年水田系统各生育期水分通量日均值
Table 4 Average daily water flux in different reproductive stages of paddy field system in 2021 and 2022 m^3

年份 Year	生育期 Reproductive stages	P_R	I_R	E_{TC}	D_R
2021	返青期	1 571	2 863	3 049	2 065
	分蘖前期	2 182	1 921	1 816	2 054
	分蘖后期	3 744	3 192	2 386	2 746
	拔节抽穗期	2 135	7 441	4 713	4 737
	乳熟期	34	338	2 282	768
2022	黄熟期	0	0	228	212
	泡田期	1 317	4 881	2 471	761
	返青期	787	6 794	2 718	4 000
	分蘖前期	6 694	930	4 366	4 990
	分蘖后期	3 051	1 336	2 592	1 667
	拔节抽穗期	3 022	4 896	6 722	944
	乳熟期	85	2 958	3 448	397
	黄熟期	77	620	356	217

注: P_R 为降雨量; I_R 为田间灌溉量; E_{TC} 为蒸发蒸腾量; D_R 为排水量。下同。
Note: P_R is precipitation; I_R is irrigation; E_{TC} is evapotranspiration; D_R is drainage. Same as below.

表 5 2021 年和 2022 年水田系统各水分通量总量
Table 5 Total water flux of paddy field system in 2021 and 2022

年份 Year	指标 Index	输入 Input		输出 Output	
		P_R	I_R	E_{TC}	D_R
2021	水量/ m^3	215 319	382 293	315 540	292 249
	占比/%	36.03	63.97	51.92	48.08
2022	水量/ m^3	368 161	383 036	481 306	272 803
	占比/%	49.01	50.99	63.82	36.18

2.2 塘堰系统水量计算结果及分析

2.2.1 塘堰系统水分通量比较

各生育期塘堰水分通量日均值见表 6, 2021 年由于未监测泡田期, 仅有拔节孕穗期存在渠道补水量。抽灌量由大到小依次发生在返青期、拔节抽穗期、分蘖后期、分蘖前期、黄熟期和乳熟期。除黄熟期蒸发量较大外, 其余生育期相差不大。各生育期的渗漏量相差不大。2022 年, 渠道补水量主要集中在返青期和拔节孕穗期。抽灌量主要集中在泡田期、分蘖后期和拔节抽穗期。蒸发量随着时间增大, 在乳熟期达到极值 (650 m^3), 黄熟期有所减小。各生育期的渗漏量相差不大。

表 6 2021 年和 2022 年塘堰系统各生育期水分通量日均值

Table 6 Ponds system average daily water flux every day in different reproductive stages in 2021 and 2022 m^3

年份 Year	生育期 Reproductive stages	塘堰降雨量 precipitation to pond	渠道补水量 Canal supply	沟道来水量 Ditch supply	塘堰水面蒸发量 Evaporation from pond	塘堰渗漏量 Seepage from pond	塘堰抽灌量 Pumping irrigation from pond
2021	返青期	262	0	352	352	180	811
	分蘖前期	364	0	118	285	132	399
	分蘖后期	624	0	357	317	136	428
	拔节抽穗期	356	1 371	-204	345	155	609
	乳熟期	119	0	399	324	160	75
	黄熟期	0	0	207	470	151	242
2022	泡田期	220	0	-191	260	142	1 920
	返青期	131	1 989	77	239	138	319
	分蘖前期	1 116	127	-374	376	159	314
	分蘖后期	509	0	217	450	160	775
	拔节抽穗期	504	790	217	491	149	687
	乳熟期	13	457	337	650	151	186
	黄熟期	13	256	180	461	145	68

表 6 还表明, 沟道来水量仅在 2021 年拔节孕穗期、2022 年泡田期和分蘖前期为负值, 表明通常由沟道向塘堰补充水分, 符合常识, 但当塘堰短期输入水量较大时, 如降雨和渠道补给较大, 也会出现塘堰向沟道补充水分的情况。2022 年乳熟期、黄熟期, 降雨较少、蒸发量较

大导致塘堰缺水且田间仍需灌水, 灌区管理者也对塘堰进行了渠道补给, 较为及时。2022 年从分蘖前期开始, 各生育期蒸发量均高于 2021 年, 表明 2022 年温度较高, 与 2.1.2 分析结果一致。

由全生育期水分通量总量分析可得 (表 7), 渠道

补水量和抽灌量分别为占比最大的输入量和输出量。2022 年抽灌量和蒸发量占比增大、渗漏量占比较小，因

为 2022 年温度更高，塘堰比 2021 年缺水，蓄水量减少导致渗漏量也相应减少。

表 7 2021 年和 2022 年塘堰系统各水分通量总量
Table 7 Total water flux of pond system in 2021 and 2022

年份 Year	指标 Index	输入 Input			输出 Output		
		降雨 Precipitation	渠道补水 Canal supply	沟道来水 Ditch supply	蒸发 Evaporation	渗漏 Seepage	抽灌 Pumping irrigation
2021	水量/m³	37 150	39 748	16 674	39 081	17 524	55 781
	占比/%	39.70	42.48	17.82	34.77	15.59	49.63
2022	水量/m³	61 380	61 468	3 347	52 113	18 719	72 473
	占比/%	48.64	48.71	2.65	36.36	13.06	50.57

2.2.2 各生育期塘堰系统蓄水量组成分析

由 2.2.1 可知，塘堰系统通过收集降雨、沟道来水，还通过渠道补水及时补充水量，除消耗初始蓄水量外，还消耗降雨、渠道补给和沟道来水。因此厘清水分来源

对于探究塘堰水分运动规律至关重要。以每个生育期为周期，在每个生育期末将各输入量和初始蓄水量按各自比例减少，得到各生育期末塘堰蓄水量组成及其占比（表 8）。

表 8 2021 年和 2022 年各生育期塘堰蓄水量组成及其占比
Table 8 Components and its proportion of ponds storage in different reproductive stages in 2021 and 2022

年份 Year	生育期 Reproductive stages	初始蓄水量 Initial storage		降雨 Precipitation		渠道补水 Canal supply		沟道来水 Ditch supply	
		水量	占比	水量	占比	水量	占比	水量	占比
		Water amount/m³	Proportion/%	Water amount/m³	Proportion/%	Water amount/m³	Proportion/%	Water amount/m³	Proportion/%
2021	返青期初	83 061	100						
	返青期末	59 654	87.12	3 763	5.49			5 057	7.39
	分蘖前期末	42 036	71.93	10 341	17.69			6 062	10.37
	分蘖后期末	34 445	57.46	16 145	26.93			9 352	15.60
	拔节抽穗期末	22 519	31.31	17 304	24.06	25 986	36.13	6 114	8.50
	乳熟期末	20 733	29.01	17 141	23.98	23 925	33.48	9 669	13.53
	黄熟期末	18 063	28.11	14 934	23.24	20 844	32.44	10 406	16.20
2022	泡田期初	81 184	100						
	泡田期末	51 970	96.86	1 687	3.14				
	返青期末	46 254	63.21	3 019	4.13	23 015	31.45	893	1.22
	分蘖前期末	30 890	41.87	24 375	33.04	17 921	24.29	597	0.81
	分蘖后期末	22 870	36.17	24 071	38.07	13 268	20.98	3 018	4.77
	拔节抽穗期末	14 485	21.07	24 817	36.10	23 405	34.05	6 033	8.78
	乳熟期末	12 461	18.66	21 483	32.17	24 464	36.63	8 381	12.55
	黄熟期末	11 063	17.27	19 211	29.98	24 447	38.15	9 354	14.60

2021 年，除黄熟期外，降雨量一直在增加，降雨量占比呈先增大后减小的趋势。渠道补水量出现在拔节抽穗期，并直接成为占比最大的塘堰水量。沟道来水占比在拔节抽穗期下降较多，系渠道补水过多，塘堰反向补给沟道所致。黄熟期末，初始蓄水量、降雨量、渠道补水量和沟道来水量分别占比 28.11%、23.24%、32.44% 和 16.20%，即整个生育期塘堰消耗了初始蓄水量的 71.89%。

2022 年，降雨量及其占比在分蘖后期之前呈增加趋势，之后呈减少趋势，分蘖前期和分蘖后期增速较快。沟道来水量及其占比在分蘖前期减少，系塘堰反向补给沟道所致。黄熟期末，初始蓄水量、降雨量、渠道补水量和沟道来水量分别占 17.27%、29.98%、38.15% 和 14.60%，即整个生育期塘堰消耗了初始蓄水量的 82.73%。

综合 2 a 的结果，渠道补水量在生育期结束时都是占比最大的组成成分，沟道来水量都是占比最小的组成成分，表明塘堰如果缺少渠道补给，光靠降雨和沟道来水补充，塘堰水分将会严重亏缺。

综合 2.2 可知，因为存在大量的抽灌，生育期内塘堰缺水严重，对渠道补水较为依赖。塘堰水循环特征以主要受人类活动影响的渠道水补给—抽灌的横向运动为主。

2.3 沟道水量计算结果及分析

2.3.1 直灌田间水量和渠系损失量计算

灌溉水从三干渠直接灌入斗渠，属于越级取水，塘堰周边没有渠道，渠道补给塘堰是通过斗渠直接引入塘堰上游的排水沟道，故仅考虑斗渠输水损失。渠道直灌田间需考虑斗渠、农渠和田间输水损失，根据研究区灌溉水利用系数^[29]，可得 2 种情况灌溉水利用系数分别为 0.817 和 0.694。2 a 田间直灌量为 20 150 和 38 445 m³，渠系损失总量为 17 762 和 30 765 m³（表 9）。

表 9 2021 和 2022 年研究区灌溉水量去向
Table 9 Terminal water flow in the study area in 2021 and 2022

指标 Index	2021	2022
三干渠灌入水量 Total irrigation from 3 rd channel/m³	77 661	130 590
塘堰补给量 Irrigation for ponds/m³	39 748	61 468
塘堰补给渠系损失 Channel leakage recharge/m³	8 891	13 750
灌入田间水量 Irrigation for paddy field/m³	20 150	38 445
灌入田间渠系损失 Channel leakage recharge/m³	8 871	16 925
渠系损失总量 Total channel leakage recharge/m³	17 762	30 675

各生育期塘堰水分通量日均值见表 10，补充塘堰水

量即 2.2.1 节的沟道来水量, 塘堰渗漏即 2.2.1 渗漏量, 不再赘述。2 a 的田间排水量和抽灌量随生育期先增大后减小, 2021 年田间排水量最大值发生在拔节抽穗期, 为 4 737 m³, 2022 年发生在分蘖前期, 为 4 990 m³, 较为

提前。2021 年拔节抽穗期和 2022 年返青期抽灌水量大于田间排水量, 是因为渠系渗漏补给较大。2021 年返青期、2022 年分蘖前期和分蘖后期斗沟排水量较大, 表明期间沟道水分较为充裕, 部分多余的水分被排出。

表 10 2021 年和 2022 年沟道系统各生育期水分通量日均值

Table 10 Ditch system average daily water flux every day in reproductive stages in 2021 and 2022 m³

年份 Year	生育期 Reproductive stages	田间排水 Paddy drainage	渠系渗漏补给 Channel leakage recharge	降雨 Precipitation	塘堰渗漏 Ponds seepage	抽灌 Pumping irrigation from ditch	斗沟排水 Drainage of ditch	蒸发 Evaproation	补充塘堰 Supply ponds
2021	返青期	2 065	0	127	180	1 254	682	84	352
	分蘖前期	2 054	0	177	132	2 105	47	92	118
	分蘖后期	2 746	0	303	136	2 665	65	99	357
	拔节抽穗期	4 737	612	173	155	5 492	288	102	-204
	乳熟期	768	0	3	160	87	359	85	399
	黄熟期	212	0	0	151	15	9	132	207
2022	泡田期	761	0	107	142	1 057	68	75	-191
	返青期	4 000	934	64	138	4 891	94	74	77
	分蘖前期	4 990	28	542	159	4 848	1 147	99	-374
	分蘖后期	1 667	0	247	160	1 184	556	118	217
	拔节抽穗期	944	529	245	149	1 326	186	139	217
	乳熟期	397	102	7	151	93	45	182	337
	黄熟期	217	57	6	145	97	14	135	180

2. 3. 2 沟道系统水分通量总量分析

由全生育期水分通量总量分析可得 (表 11), 2022 年斗沟排水量占比增大了 6.4%, 补充塘堰占比减少了 3.88%, 因为前 3 个生育期田间水量充裕, 沟道

水排走。田间排水和抽灌分别是占比最大输入和输出量。

综合 2.3.1 和 2.3.2 节分析, 沟道水循环特征以主要受人类活动影响的田间排水—抽灌的横向运动为主。

表 11 2021 年和 2022 年沟道系统各水分通量总量

Table 11 Total water flux of ditch system in 2021 and 2022

年份 Year	指标 Index	输入 Input				输出 Output			
		田间排水 Paddy drainage	渠系渗漏补给 Channel leakage recharge	降雨 Precipitation	塘堰渗漏 Ponds seepage	抽灌 Pumping irrigation from ditch	斗沟排水 Drainage of ditch	蒸发 Evaproation	补充塘堰 Supply ponds
2021	水量/m ³	292 249	17 762	17 439	17 524	288 593	28 446	11 262	16 674
	占比/%	84.72	5.15	5.06	5.08	83.66	8.25	3.26	4.83
2022	水量/m ³	272 803	30 678	29 819	18 720	282 608	51 568	14 496	3 348
	占比/%	77.50	8.71	8.47	5.32	80.28	14.65	4.12	0.95

2. 4 灌溉水量验证及分析

水田的灌溉来源有渠道直灌、塘堰抽灌和沟道抽灌, 较为复杂。针对南方丘陵灌区的现状, 本研究提出一种适用于多水源灌区的灌溉水量复核方法 “首尾比较法”。通过对灌溉输水环节的首部和尾部进行监测, 将首部 (各水源) 各自的水量厘清, 再对应各输水环节的效率算出各自最终到达尾部 (田间) 的水量, 求和后与尾部 (田间) 实际获得的水量进行比较, 具体实例如下:

本研究中首部包括塘堰、沟道和斗渠渠首, 由于塘堰供水和沟道供水都是就近采用水泵抽灌的方法, 无需渠系输配水, 途中几乎无损耗^[30], 故塘堰供水和沟道供水的灌溉水利用系数为 1.0, 塘堰抽灌量和沟道抽灌量在表 7 和表 11 中已求出。从斗渠渠首灌至田间灌溉水利用系数为 0.694 3, 灌入田间的净水量在表 9 中已求出。尾部 (田间) 获得的水量即田间水量平衡求得的灌溉量 (表 5)。首部和尾部比较结果见表 12。

表 12 首部和尾部灌溉水量核算

Table 12 Calculation of beginning and ending irrigation water volume review

年份 Year	首部不同来源水占比 Proportion of different water sources in beginning/%			首部不同来源水量 Volume of different water sources in beginning/m ³				尾部 (田间) 实际流入 Paddy field actual inlet/m ³	首尾差值 Start-to-end difference/m ³	相对误差 Relative error/%
	塘堰 Ponds	沟道 Ditch	渠道直灌 Channel	塘堰 Ponds	沟道 Ditch	渠道直灌 Channel	小计 Total			
2021	15.30	79.17	5.53	55 781	288 592	20 150	364 524	382 292	17 768	4.65
2022	18.42	71.81	9.77	72 473	282 607	38 445	393 526	383 036	-10 490	-2.74

2021 年和 2022 年的水量平衡误差分别为 4.65% 和 -2.74%, 2021 年误差稍大, 可能是由于未监测到泡田期的田间灌溉, 水量不够完整。总的来说, 误差在可接受

范围内, “首尾比较法”可行, 为灌区灌水量管理提供参考。同时也表明研究区水量监测较为精确, 研究区水量平衡计算较为准确。

2.5 回归水及其评价指标计算结果及分析

各生育期塘堰和沟道回归水及其重复利用情况见表 13，不同生育期塘堰回归水量相差较大，2021 年分蘖后期、2022 年分蘖前期、分蘖后期、拔节抽穗期回归水量较大，回归水重复利用量基本与回归水量成正比。分蘖后期是塘堰回归水重复利用量最大的时期。与 2022 年相比，2021 年不同生育期回归水重复利用率波动较小，分蘖前期、分蘖后期和拔节孕穗期基本保持一致。2022 年泡田期塘堰回归水重复利用率最高，达到了 76.40%。2021 年和 2022 年塘堰回归水重复利用率均呈逐渐减小的趋势。两年的沟道回归水量及重复

利用水量都呈先增大后减小的趋势，2021 年在拔节抽穗期达到峰值，2022 年在分蘖前期达到峰值。2022 年分蘖前期沟道回归水量大于返青期，回归水重复利用量却小于返青期，可能是因为分蘖后期降雨较大，且田间有晒田需求，因此抽灌量不大，部分沟道来水被排走。从沟道回归水重复利用率看，2021 年拔节抽穗期达到最大值，93.37%，2022 年返青期达到最大值，95.23%。2 a 在拔节抽穗期均有所上升，系该生育期田间需要补灌所致。2 a 在乳熟期均突然减小，可能是因为乳熟期和黄熟期邻近收割，需要排干田间水分，不再需要从沟道抽灌。

表 13 2021 和 2022 年塘堰、沟道和总体回归水重复利用程度
Table 13 Ponds, ditch and total reuse of return flow degree in 2021 and 2022

年份 Year	生育期 Reproductive stages	回归水量		回归水重复利用量		回归水重复利用率		
		Ponds return flow/m³		Reuse of ponds return flow/m³		Return flow reuse rate/%		
		塘堰 Ponds	沟道 Ditch	塘堰 Ponds	沟道 Ditch	塘堰 Ponds	沟道 Ditch	总体 Overall
2021	返青期	545	1936	329	1 024	60.39	52.88	54.53
	分蘖前期	409	2 153	200	1918	48.92	89.10	82.68
	分蘖后期	890	2 730	433	2 283	48.61	83.65	75.04
	拔节抽穗期	290	5 780	134	5 397	46.38	93.37	91.12
	乳熟期	483	446	65	42	13.43	9.39	11.49
	黄熟期	188	24	53	1	28.01	4.04	25.28
	全年					43.28	81.61	79.47
2022	泡田期	201	1 125	154	991	76.40	88.06	86.29
	返青期	196	4 985	90	4 748	45.83	95.23	93.36
	分蘖前期	840	5 994	216	4 769	25.67	79.56	72.93
	分蘖后期	643	1 740	360	993	55.94	57.06	56.75
	拔节抽穗期	593	1 511	307	1 073	51.77	71.00	65.58
	乳熟期	311	138	59	20	18.81	14.17	17.39
	黄熟期	173	112	17	25	10.10	22.83	15.09
	全年					40.63	80.86	73.02

2021 年和 2022 年塘堰、沟道和总体回归水重复利用率见表 13。塘堰回归水总重复利用率 2 a 相差 2.65 百分点，沟道回归水总重复利用率年际变化则较为稳定，且为塘堰的 2 倍。由于沟道回归水及其重复利用量和利用率都远大于塘堰，故总体回归水利用率变化与沟道一致。2022 年总体回归水重复利用率比 2021 年低 6.45 百分点，系沟道抽灌在灌溉来源中占比下降所致。

2.6 渠道灌溉特征分析

从三干渠灌入研究区的渠道灌溉水是研究区除降雨以外的外部水分来源，用于补给塘堰和水田。以监测较完整的 2022 年为例，探究渠道灌水后灌溉水的耗散途径（图 4）。根据表 9，进入水田、塘堰和沟道的渠系水分别占比 29.44%、47.07% 和 23.49%。由 2.1.2 可知，进入水田的水分有 63.82% 用于蒸发蒸腾，36.18% 被排出田间进入沟道。由 2.2.1 可知，进入塘堰的水分有 50.57% 用于抽灌进入田间，36.36% 用于蒸发，13.06% 通过渗漏进入了沟道。由 2.3.2 可知，进入沟道的水分有 80.28% 被抽灌回田间，4.12% 用于蒸发，0.95% 补给塘堰，14.65% 排走。

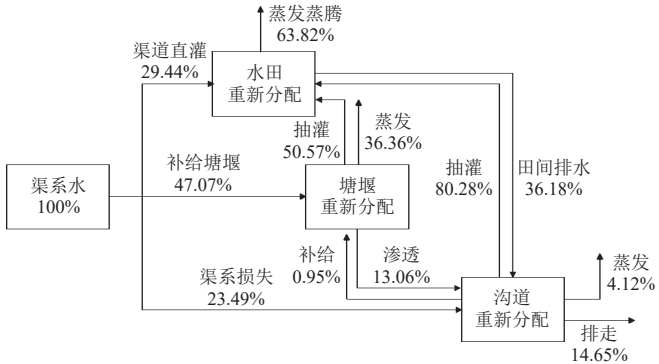
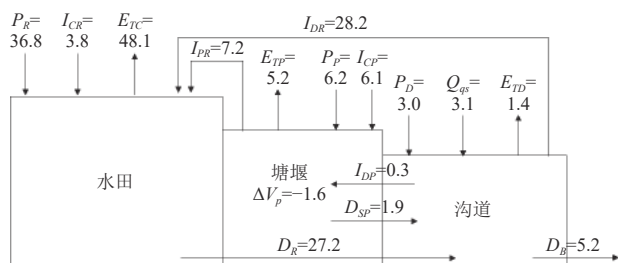


图 4 2022 研究区渠道灌水耗散路径图
Fig.4 Consumption pathway of channel irrigation water in study area

2.7 水循环路径分析

解决水问题的关键在于将水循环的各个环节链接成整体、厘清水分运动过程。以 2022 年为例，研究区水稻生育期水循环路径如图 5，进入水田的水量除了降雨（36.8 万 m³），还有渠道直灌（3.8 万 m³）、塘堰抽灌（7.2 万 m³）和沟道抽灌（28.2 万 m³），经过田间蒸发蒸腾（48.1 万 m³）后，排入沟道（27.2 万 m³）。进入塘堰的水量有降雨（6.2 万 m³）、渠道补给（6.1 万 m³）

和沟道来水 (0.3 万 m^3)，塘堰中的水除了供给灌溉 (7.2 万 m^3) 外，用于蒸发 (5.2 万 m^3) 和渗漏 (1.9 万 m^3)。降雨 (3.0 万 m^3)、田间排水、渠系损失 (3.1 万 m^3)、塘堰渗漏进入沟道后，除了供给灌溉、蒸发 (1.4 万 m^3)、补充塘堰外，剩余排出试验区 (5.2 万 m^3)。



注: P_R 为田间降雨量, 10^4 m^3 ; I_{CR} 为渠道直灌田间水量, 10^4 m^3 ; E_{TC} 为田间蒸发蒸腾量, 10^4 m^3 ; I_{DR} 为沟道抽灌量, 从沟道抽灌至田间的水量, 10^4 m^3 ; I_{PR} 为塘堰抽灌量, 从塘堰抽灌至田间的水量, 10^4 m^3 ; E_{TP} 为塘堰水面蒸发量, 10^4 m^3 ; P_P 为塘堰降雨量, 10^4 m^3 ; I_{CP} 为渠道补水量, 渠道灌水补给塘堰的水量, 10^4 m^3 ; I_{DP} 为沟道来水量, 10^4 m^3 ; D_{SP} 为塘堰渗漏量, 10^4 m^3 ; D_R 为田间排水量, 10^4 m^3 ; ΔV_P 为塘堰的蓄水量变化, 10^4 m^3 ; P_D 为沟道降雨量, 10^4 m^3 ; Q_{gs} 为渠系损失量, 10^4 m^3 ; E_{TD} 为沟道水面蒸发量, 10^4 m^3 ; D_B 为斗沟排出水量, 10^4 m^3 ;

Note: P_R is precipitation in paddy field, 10^4 m^3 ; I_{CR} is Irrigation from channel to paddy field, 10^4 m^3 ; E_{TC} is evapotranspiration in the paddy field, 10^4 m^3 ; I_{DR} is pumping irrigation from ditch to paddy field, 10^4 m^3 ; I_{PR} is pumping irrigation from ponds to paddy field, 10^4 m^3 ; E_{TP} is evapotranspiration in the pond, 10^4 m^3 ; P_P is precipitation in the pond, 10^4 m^3 ; I_{CP} is irrigation from channel to pond, 10^4 m^3 ; I_{DP} is water from ditch to pond, 10^4 m^3 ; D_{SP} is seepage in the pond, 10^4 m^3 ; D_R is drainage from paddy field, 10^4 m^3 ; ΔV_P is the change of pond storage, 10^4 m^3 ; P_D is precipitation in the ditch, 10^4 m^3 ; Q_{gs} is channel leakage recharge, 10^4 m^3 ; E_{TD} is evapotranspiration in the ditch, 10^4 m^3 ; D_B is drainage of bucket ditch, 10^4 m^3 ;

图 5 研究区水循环通量

Fig.5 Hydrological cycle in study area

3 讨论

回归水是一种可再利用的水资源^[31], 回归水重复利用能够提高水分生产率, 减少灌区弃水^[28]。邵培寅等^[16]在该地区进行的封闭灌排单元 (面积 $2.4 \times 10^{-3} \text{ km}^2$) 试验表明, 通过在沟道拦蓄排水重复利用, 可提供 51.80% 的灌溉定额, 比本研究 (面积 1.16 km^2) 71.81% 的结果稍小 (表 8)。吴迪等^[30]在该地区 (面积 43.3 km^2) 的研究认为, 农民基本会将排水沟中的水均取来灌溉, 沟道灌溉取水比例约为 90%, 比本研究的结果 80.28% 稍大, 表明在南方丘陵灌区尺度越大, 沟道排水再利用程度越高。

按照渠道灌水后灌溉水的耗散途径, 渠系水初次分配有 29.44% 的水分进入田间, 进入塘堰和沟道的水分经过二次分配, 分别有占原渠系水 23.80% 和 18.86% 进入了田间, 仅算初次分配和二次分配, 则共有 72.10% 的水分进入了田间, 沟道排走的水量仅占渠系水的 3.44%, 剩余 24.46% 的水分则留在研究区中用于蒸发或不同系统之间的水量交换, 该部分仍有被重复利用的可能。按照灌溉水利用系数的定义^[29], 2022 年研究区灌溉水利用系数至少为 0.721。说明对于存在较高程度回归水重复利用的地区, 仅凭灌溉水利用系数来评价是灌溉水的利用效率是非常局限的。

本文监测的 2021 和 2022 年生育期降雨较少, 均属于枯水年, 为防止仅依靠雨养稻田水分输入过少而影响生长^[32], 因此沟道出口拦蓄措施比较到位, 沟道和塘堰的水量输出以抽灌为主。而丰水年降雨较多, 沟道输出水量以排水为主, 人类活动干预减少, 塘堰和沟道储水功能减弱, 此时水分运动规律将发生较大变化。因此, 需要更长期的试验来对比丰、平、枯不同年型的灌区水循环规律。

4 结论

本研究基于对南方丘陵灌区典型研究区的野外观测试验, 将研究区概化为水田、塘堰和沟道 3 种不同的系统, 针对各自的水循环特点构建水量平衡公式, 分生育期评价水循环特征及回归水重复利用规律。主要结论如下:

1) 水田水循环以灌溉—蒸发蒸腾的垂向运动特征为主, 塘堰水循环以渠道补给—抽灌的横向运动特征为主, 沟道水循环以田间排水—抽灌的横向运动为主。生育期结束塘堰初始蓄水量消耗了 82.73%, 渠道补给成为最大的补充, 占 38.15%。塘堰和沟道水循环受人类活动影响严重。

2) 对于多水源灌区, 提出采用“首尾比较法”对灌溉输水的源头和末尾进行比较, 为灌区灌水量计算及复核提供了有效思路。渠道直灌、沟道、塘堰分别占田间灌溉来源的 9.77%、71.81% 和 18.42%。

3) 南方丘陵灌区水分的重复利用程度较高, 以渠道灌溉水为例, 初次分配仅有 29.44% 进入了田间, 但塘堰和沟道二次分配使得至少 72.10% 的渠道水用于灌溉, 仅有 3.44% 排走未被利用。塘堰回归水重复利用率全生育期逐渐减小, 沟道是回归水重复利用的主要场所, 且回归水重复利用率是塘堰的 2 倍 (80.86%)。得益于高效的回归水收集和重复利用, 灌区管理“补给塘堰为主、直灌田间为辅”的灌溉策略可行、实际灌溉效率较高。

[参 考 文 献]

- [1] 代俊峰, 崔远来. 灌溉水文学及其研究进展[J]. 水科学进展, 2006, 19(2): 294-300.
DAI Junfeng, CUI Yuanlai. Progress in study of the irrigation hydrology[J]. Advances in Water Science, 2006, 19(2): 294-300. (in Chinese with English abstract)
- [2] 任东阳, 徐旭, 黄冠华. 河套灌区典型灌排单元农田耗水机制研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 98-105.
REN Dongyang, XU Xu, HUANG Guanhua. Irrigation water use in typical irrigation and drainage system of Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(1): 98-105. (in Chinese with English abstract)
- [3] WU D, CUI Y L, LI D C. Calculation framework for agricultural irrigation water consumption in multi-source

- irrigation systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244.
- [4] 陈述, 邵东国, 李浩鑫, 等. 基于粒子群人工蜂群算法的灌区渠-塘-田优化调配耦合模型[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 90-97.
CHEN Shu, SHAO Dongguo, LI Haoxin, et al. Coupled allocation model for optimizing water in canal-pond-field based on artificial bee colony and particle swarm algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(20): 90-97. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子间水盐运移规律及平衡分析[J]. *水利学报*, 2019, 50(12): 1518-1528.
WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Analysis of water and salt transportation and balance during cultivated land, waste land and lake system in Hetao Irrigation Area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(12): 1518-1528. (in Chinese with English abstract)
- [6] 马欢, 杨大文, 雷慧闽, 等. Hydrus-1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 6-12.
MA Huan, YANG Dawen, LEI Huimin, et al. Application and improvement of Hydrus-1D model for analyzing water cycle in an agricultural field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(3): 6-12. (in Chinese with English abstract)
- [7] 毕彦杰, 赵晶, 张文鸽, 等. WACM4.0 模型模拟内蒙古河套地区山水林田湖草系统水循环[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(14): 148-158.
BI Yanjie, ZHAO Jing, ZHANG Wenge, et al. Simulation of hydrological cycle for mountain-water-forest-cropland-lake-grass system in Hetao region, Inner Mongolia of China by WACM4.0 model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(14): 148-158. (in Chinese with English abstract)
- [8] DONG B, MAO Z, BROWN L, et al. Irrigation ponds: Possibility and potentials for the treatment of drainage water from paddy fields in Zhanghe Irrigation System[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(11): 3320-3327.
- [9] 何军, 崔远来, 王建鹏, 等. 不同尺度稻田氮磷排放规律试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 56-62.
HE Jun, CUI Yuanlai, WANG Jianpeng, et al. Experiments on nitrogen and phosphorus losses from paddy fields under different scales[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(10): 56-62. (in Chinese with English abstract)
- [10] SHAO D, TAN X, LIU H, et al. Performance analysis of on-farm irrigation tanks on agricultural drainage water reuse and treatment[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2013, 75: 1-13.
- [11] 胡能杰, 邵东国, 陈述, 等. 基于系统动力学的稻田塘堰系统水转化模拟及验证[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 130-135.
HU Nengjie, SHAO Dongguo, CHEN Shu, et al. Simulation and verification of water transformation of rice paddy and pond system based on system dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(12): 130-135. (in Chinese with English abstract)
- [12] DAI J F, CUI Y L, CAI X L, et al. Brown, Yuhui Shang. Influence of water management on the water cycle in a small watershed irrigation system based on a distributed hydrologic model[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 174: 52-60.
- [13] DI W, CUI Y L, LUO Y F. Irrigation efficiency and water-saving potential considering reuse of return flow[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 519-527.
- [14] 于颖多, 焦平金, 许迪, 等. 排水循环灌溉驱动的稻区水循环模型与评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 138-143.
YU Yingduo, JIAO Pingjin, XU Di, et al. Water cycle model and its assessment under cyclic irrigation of drainage water in paddy district[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(11): 138-143. (in Chinese with English abstract)
- [15] 胡能杰, 邵东国, 陈述, 等. 基于随机降雨模拟的灌区塘坝蓄水方案优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 105-110.
HU Nengjie, SHAO Dongguo, CHEN Shu, et al. Optimal water store control of ponds in irrigation district based on stochastic precipitation simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(18): 105-110. (in Chinese with English abstract)
- [16] 邵培寅, 李亚龙, 熊玉江, 等. 丘陵灌区排水循环灌溉模式节水减排效果研究[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(2): 136-144.
SHAO Peiyin, LI Yalong, XIONG Yujiang, et al. Reusing effluent water in drainage ditches for irrigation in hilly regions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(2): 136-144. (in Chinese with English abstract)
- [17] 潘少斌, 刘路广, 吴慧蓉, 等. 湖北省中稻灌溉定额修订研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(10): 114-120.
PAN Shaobin, LIU Luguang, WU Huiron, et al. Study on revision of middle rice irrigation quota in Hubei Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(10): 114-120. (in Chinese with English abstract)

- [18] 李山, 罗纨, 贾忠华, 等. 基于 DRAINMOD 模型估算灌区浅层地下水利用量及盐分累积[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 89-97.
LI Shan, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Shallow groundwater use and salinity buildup based on DRAINMOD predicted field hydrology in irrigated areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(22): 89-97. (in Chinese with English abstract)
- [19] 邹家荣, 罗纨, 李林, 等. 灌排控制措施结合沟塘湿地改善水稻灌区排水水质的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 98-107.
ZOU Jiarong, LUO Wan, LI Lin, et al. Simulating the effects of irrigation and drainage control combined with ditch-pond wetlands on drainage water quality improvement in a rice irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 98-107. (in Chinese with English abstract)
- [20] 邵东国, 杨霞, 徐保利, 等. 南方丘陵区多层土壤结构水平向和垂向渗流特征试验与模拟研究[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 799-807.
SHAO Dongguo, YANG Xia, XU Baoli, et al. Field experiment and simulation of lateral and vertical water flow in multi-layer soil in hilly region of southern China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(7): 799-807. (in Chinese with English abstract)
- [21] 罗纨, 贾忠华, R W Skaggs, 等. 利用 DRAINMOD 模型模拟银南灌区稻田排水过程[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 53-57.
LUO Wan, JIA Zhonghua, SKAGGS W R, et al. Rice fields drainage process simulation in Yinnan irrigation district with DRAINMOD model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(9): 53-57. (in Chinese with English abstract)
- [22] 高学睿, 董斌, 秦大庸, 等. 用 DrainMOD 模型模拟稻田排水与氮素流失[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 52-58.
GAO Xuerui, DONG Bin, QIN Dayong, et al. Simulation of drainage process and nitrogen loss in paddy field using DrainMOD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 52-58. (in Chinese with English abstract)
- [23] 洪林, 罗文兵. 基于 DRAINMOD 的农田地表径流氮素流失动态模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 703-709.
HONG Lin, LUO Wenbing. Dynamic simulation of nitrogen losses in surface runoff from farmlands using the DRAINMOD model[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 703-709. (in Chinese with English abstract)
- [24] KANWAR R, JOHNSON H, BAKER J. Comparison of simulated and measured nitrate losses in tile effluent[J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(5): 1451-1457.
- [25] TAN X Z, SHAO D G, GU W Q. Improving water reuse in paddy field districts with cascaded on-farm ponds using hydrologic model simulations[J]. Water Resources Management, 2018, 32(5): 1849-1865.
- [26] 王远明, 张彼, 李成荣. 宜昌站水面蒸发折算系数分析[J]. 人民长江, 1999, 30(1): 43-44/47.
WANG Yuanming, ZHANG Bi, LI Chengrong. The study of pan coefficients of evaporation pans of water[J]. Yangtze River, 1999, 30(1): 43-44/47. (in Chinese with English abstract)
- [27] 蔡学良, 崔远来, 代俊峰, 等. 长藤结瓜灌溉系统回归水重复利用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(2): 46-50.
CAI Xueliang, CUI Yuanlai, DAI Junfeng, et al. Small storage based return flows estimation in melon-on-the-vine irrigation system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(2): 46-50. (in Chinese with English abstract)
- [28] 董斌, 崔远来, 李远华. 水稻灌区节水灌溉的尺度效应[J]. 水科学进展, 2005, 6(6): 833-839.
DONG Bin, CUI Yuanlai, LI Yuanhua. Scale effect of water saving in rice-based irrigation system[J]. Advances in Water Science, 2005, 6(6): 833-839. (in Chinese with English abstract)
- [29] 崔远来, 谭芳, 王建漳. 不同尺度首尾法及动水法测算灌溉水利用系数对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 5-10.
CUI Yuanlai, TAN Fang, WANG Jianzhang. Comparison of irrigation efficiency under different scales[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 5-10. (in Chinese with English abstract)
- [30] 吴迪, 崔远来, 黄文波, 等. 基于改进 SWAT 模型的多水源灌区节水潜力尺度效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 82-90.
WU Di, CUI Yuanlai, HUANG Wenbo, et al. Scale effect of water-saving potential in multi-source irrigation systems based on modified SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 82-90. (in Chinese with English abstract)
- [31] 赵新宇, 钱武文. 不同尺度首尾法及动水法测算灌溉水利用系数对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2023(2): 45-50.
- [32] 朱世峰, 王卫光, 丁一民, 等. 基于 CMIP6 的长江中下游未来水稻高温热害时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 113-122.
ZHU Shifeng, WANG Weiguang, DING Yimin, et al. Spatiotemporal variation of future heat damage of rice in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River using CMIP6 projections[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(3): 113-122. (in Chinese with English abstract)

Hydrological cycle for Paddy-Ponds-Ditches system and reuse of return flow in Southern hilly irrigated areas

SHAO Peiyin¹, XIONG Yujiang², YUAN Niannian², PENG Zhengyi¹, LI Yalong^{2*}, SU Peilan¹,
WEI Guangfei³, YE Lei⁴, LIN Xiaowei⁵

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Agricultural Water Conservancy Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Hubei Zhanghe Hydranlic Project Administration Bureau, Jingmen 448156, China; 5. Jiangsu Kejia Engineering Design Company, Wuxi 214000, China)

Abstract: The hydrological cycle in irrigation areas under the influence of anthropogenic activities has emerged as a significant topic in the realm of water science research. The southern hilly irrigation area of China, characterized by its undulating terrain and myriad ponds, presents a unique opportunity for water storage and paddy field irrigation. However, these distinct landscape features have also given rise to a complex hydrological cycle with unclear exchange dynamics and a paucity of quantitative calculations on the reuse of return flow. To explore the fundamental laws governing water circulation in irrigation areas, we embarked on in-situ field trials over the 2a period (2021-2022), with the Yang-shu-dang watershed in the Zhanghe Irrigation System of Hubei Province, China, serving as our study area. Our approach entailed monitoring the groundwater depth of 4 typical paddy fields, the water storage levels of 5 typical ponds, as well as the flow of the bucket ditch outlet. The complexity of the hydrological cycle in southern hilly irrigation areas necessitates the development of a novel water balance formula for paddy fields, ponds, and ditches, respectively, that accurately captures their unique features. To this end, we conceived of a method for reviewing the water volume of the source and sink areas in paddy field irrigation water delivery, known as 'start-to-end comparison', which enables us to discern the locations in which reuse of return flow is taking place. Through the evaluation of the hydrological cycle and the extent of reuse of return flow during various reproductive stages, we obtained valuable insights into the significant ways in which human activities have disrupted the hydrological balance in southern hilly irrigation areas. The findings of our study revealed several valuable insights. First, the relative error for the 2 a period of paddy irrigation water amount computed by the water balance formula and the DRAINMOD model, as well as the total irrigation water volume from ponds, ditches, and channels were 4.65% and -2.74%, respectively, implying that 'start-to-end comparison' is a reliable and robust method that provides a new ideal for irrigation water volume simulation and review in multi-source irrigation areas. Further analysis revealed that the proportion of channel, ditch, and pond sources in different paddy irrigation sources were 9.77%, 71.81%, and 18.42%, respectively. Notably, due to the need for irrigation in paddy fields, 82.73% of initial pond water storage was consumed during whole reproductive stages. Moreover, canal supply, precipitation, and ditch supply accounted for 38.15%, 29.98%, and 14.60%, respectively. It transpired that the late tillering stage featured the highest reuse of water from the pond, with a gradual decline observed during the whole reproductive stage. While both the amount of return flow in the ditch and the amount of reused return flow water increased initially and then decreased, the ditch still emerged as the primary site exhibiting the reuse of return flow, with rates doubling that of ponds (80.86%). We also delved into the consumption pathways of irrigation water after channel irrigation, where in the first distribution of channel irrigation water accounted for only 29.44% into the paddy field. A second distribution facilitated the entrance of at least 72.10% of channel irrigation water into the paddy field. Intriguingly, only 3.44% of the water from channel irrigation was discharged out of the bucket ditch. The remaining 24.46% of the water lingered within the study area, with the potential for subsequent reuse. Examination of the hydrological cycle revealed that the paddy field system was characterized primarily by the vertical movement of irrigation-evaporative transpiration, while the pond system was characterized predominantly by the lateral movement of channel supply-pumping irrigation, and the ditch system was characterized primarily by the lateral movement of paddy drainage-pumping irrigation. Research showed that human activity is the main factor of effect ponds and ditch hydrological cycle. Strategies from irrigation district managers, 'the main for ponds, the secondary for paddy' met the needs of farmers and own high irrigation coefficient in southern hilly irrigated area.

Keywords: drainage; irrigation; hydrological cycle; water balance; southern hilly irrigated area; reuse of return flow