■ 农田排水 ■

文章编号: 1672 - 3317 (2023) 02 - 0136 - 09

丘陵灌区排水循环灌溉模式节水减排效果研究

邵培寅^{1,2}, 李亚龙², 熊玉江², 袁念念², 苏沛兰^{1*} (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)

摘 要:【目的】揭示丘陵灌区较为普遍的排水循环灌溉过程及其节水减排效果。【方法】针对灌区典型灌排单元, 采用原位试验监测农沟和斗沟中水量和氮磷质量浓度变化,分析回归率(回归水量/抽灌水量)、负荷削减量、负荷 削减率时空变化规律,并通过相关分析、逐步回归方法求解负荷削减率的影响因素。【结果】监测到抽灌-回归过程 24次,总回归率为89.93%。生育期总磷、总氮、硝态氮和氨态氮负荷削减量分别为0.28、3.27、2.35、2.35 kg/hm²。 总磷、总氮、氨态氮负荷的削减发生在田间和农沟,硝态氮负荷的削减发生在斗沟。控排措施使得降水后排水负荷 中的硝态氮和氨态氮达到了稳定。4 种负荷削减率都与其质量浓度之比(回归质量浓度/抽灌质量浓度)显著相关, 总磷、氨态氮削减率与回归率显著相关,总氮、硝态氮削减率与抽灌当天及第2 天降水量显著相关,硝态氮削减率 还与温度显著相关。【结论】抽灌-回归-控排灌溉模式在节水、方便农户灌溉的同时,提高了水肥利用率,降低了排 水给下游水体带来的风险,在灌排单元尺度上节水和控污减排效果良好。

关键词: 丘陵灌区; 循环灌溉; 氮磷负荷; 水稻; 控污减排

中图分类号: S274; S152 文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022315



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.

0 引 言

【研究意义】灌区灌溉和排水受人为干预较多^[1]。 丘陵灌区因塘堰、沟渠和水库众多,降水径流、灌溉 退水通过塘堰、沟渠等水体受到人为拦蓄进行重复利 用现象十分普遍^[2]。灌区排水再利用作为一种调蓄雨 水、提高灌溉保证率和减少农业面源污染的有效措 施^[3],已被较多地区重视并加以采用^[4-5]。【研究进展】 根据排水再利用的对象,排水再利用可分为2种,一 种是排水自流灌溉下级渠道(灌溉回归水重复利用^[6]), 另一种是排水依靠水泵回灌本级渠道(循环灌溉^[7]), 相较而言,循环灌溉由于水肥重复利用,下游受到 污染的风险更小。Hama等^[8-9]研究发现,循环灌溉 能提供作物需氮量的8%~16%,Takeda等^[10]汇总了 8个灌溉期的监测资料,发现循环灌溉的负荷削减量 与田间水停留时间有关。Feng等^[7]发现循环灌溉系 于颖多等^[12]评价了循环灌溉排水量估算模型,发现田面水和渗透水的磷素不受灌溉水中磷素的变化影响。

【切入点】然而以上研究大多是针对流域尺度或田 间尺度的节水效益及削减效果分析,涉及灌排单元 尺度和循环灌溉各环节对于节水及削减效果的影响 因素研究少见报道。另外,控制、存蓄排水是循环 灌溉中不可缺少的一环。而关于沟渠控制排水的研 究^[13-15]大多是为调控灌排单元地下水位以增加作物 对地下水的利用[16-17]、发挥沟渠湿地效应以截污减 排^[18-19],而非为了存蓄水分以供灌溉。涉及农户自发 循环灌溉而促成的控制排水研究少见报道。【拟解决 的关键问题】本研究针对丘陵灌区典型灌排单元进行 原位观测,将循环灌溉中的水流运动细化为抽灌、回 归和控排3个环节,具体分析抽灌-回归-控排灌溉模 式下各个环节水流和负荷的动态变化及其影响因素, 综合评价灌排单元的节水效果及控污减排机理,为丘 陵灌区的排水再利用和非点源污染防控相结合进一 步研究和推广提供借鉴和参考。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

研究区位于漳河灌区三干渠南 1.0 km 处,灌区 主要灌溉水源为 10 km 外的漳河水库。灌区配有完备

收稿日期: 2022-09-03

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资助(U2040213);清华大学联合开放基金 项目(sklhse-2022-Iow09);2021年科技兴蒙项目(2021CG0013)

作者简介: 邵培寅(1998-),男。硕士研究生,主要研究方向为灌溉水文学。E-mail: 1137263554@qq.com

通信作者:苏沛兰(1971-),女。副教授,博士,主要研究方向为高效节 水灌溉理论与技术。E-mail: suporben@126.com

的干、支、斗、农灌排渠系及各种小型水库、塘堰, 灌区地形主要为丘陵与平原结合区,其自然条件在南 方丘陵地区具有一定的代表性。灌区中小型水库 300 多座,塘堰约 8.16 万座,星罗棋布,形成了"长藤 结瓜"式灌溉系统。

漳河灌区气候属于亚热带季风气候,年平均气温 16 ℃,多年平均降水量 968.9 mm,降水集中在 4—9 月,此时期降水量约占全年降水量的 70%,5—8 月为 密集降水期。主要农作物为1年2季稻油(麦)轮作。 试验区的水稻田在5月下旬播种,9月上旬收割,水稻 生长期近 112 d。稻季农民习惯采用底肥加追肥的方式, 底肥在水稻移栽前整田施用,追肥在6月下旬施用。 1.2 试验设计

整个循环灌溉过程可分为抽灌、回归和控排3个 过程。在水稻生长期,研究区内农户通常用水泵将田 块周边沟渠中的蓄水抽灌至田间(抽灌),田间水通 过田埂侧渗或降水后自流进入本级或下级斗沟(回 归),沟渠下游被堵住,用来存蓄雨后田间排水和田 埂侧向渗漏水(控排)。蓄水供平日抽灌使用,需要 灌溉时再抽灌,如此循环往复。

选取循环灌溉典型灌排单元作为研究对象(图1)。 2相邻田块中间田埂宽15 cm,田块1比田块2低10 cm,田埂处开有缺口,田块2田间水层超过5 cm时 可自流排入田1。田块1上方田埂宽15 cm, 开有缺 口,田块1田间水层超过5 cm时可自流进入相邻农 沟, 农沟与斗沟相通, 长度分别为 20 m 和 180 m, 农沟断面为底宽 0.5 m, 深 0.5 m 的矩形。斗沟断面 为底宽 0.7 m、坡比 1:1 的梯形, 斗沟深 1 m。田块 总面积 2 440 m²。保持下游涵洞沙袋高度不变, 仅当 降水发生斗沟水位超过沙袋高度(约0.5m)时才向 下游排水。试验期间为排除降水外其他水量输入项, 将农沟上游和斗沟上游用麻袋堵住,并定期监测斗沟 上游段水位,水位较高时抽灌至下游堰塘,以防上游 来水。周边田块相对灌排单元一侧田埂铺设防渗土工 膜,防止周边田块田间水向灌排单元侧渗。因此,整 个灌排单元可看做封闭区域。本研究为原位试验,对 农户的田间管理和抽灌行为只做记录,不做任何干涉。

1.3 试验观测与测试方法

1.3.1 水量观测与分析

本研究对抽灌-回归-控排灌溉模式中的抽灌水量、 回归水量、排水量和降水量进行监测。

 1)抽灌水量为斗沟抽灌至田间的水量。农户每次抽灌需要 4~5 h。根据斗沟每日水位波动及斗沟梯 形断面推求各次抽灌水量,生育期斗沟水位变化及典型抽灌过程曲线见图 2,人工抽灌前后斗沟库容差即 为抽灌水量。



图1 典型灌排单元及控排抽灌现象

Fig.1 Schematic diagram of typical irrigation and drainage unit and phenomenon of pumping irrigation and drainage controlled



图 2 生育期斗沟水位变化及典型抽灌过程曲线

Fig.2 Variation of water level in bucket ditch during growth

period and typical pumping irrigation process curve

2)回归水量为抽灌田间水层超过田埂排水口高度自流排出田间的水量与田埂侧渗水量之和,回归水 先汇入农沟再排入斗沟,回归水量即为农沟排水量。 农沟出口设有巴歇尔槽,使用 HOBO 水位计监测每 小时水位,对应巴歇尔槽公式^[20]求得回归水量。

3)排水量为斗沟水位高出涵洞沙袋,通过涵洞向下游排水量。在斗沟下游涵洞出口处设置 HOBO水位计监测每小时水位,对应圆形断面自由出流水位流量关系曲线^[18],求得排水量。

4)降水量。通过研究区内设置的 HOBO RG3 翻 斗式自记雨量记录仪记录。

1.3.2 水质观测与分析

在农沟和斗沟上下游分别设置 2 个取样点,每次 取样对 2 种沟别各取上下游混合样。取样频率为 3 d 1 次,遇降水、施肥则在事件发生第 1、第 3、第 5、 第 7 天加取。另外在生育期取 3 次降水水样。2 种沟 别及雨水样总计取样 35 次,143 个。每次取样 200 mL, 原状水样送实验室分析。水样分析指标包括总磷(TP)、 总氮(TN)、氨态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁺-N)。 分析方法按照《水和废水监测分析方法》^[21]中相关规 定进行。

2 结果与分析

本研究循环灌溉模式发生在返青期、分蘖期、拔 节孕穗期和抽穗开花期,其他生育期抽灌发生较少。 经过筛选,计算分析 6 月 8 日—8 月 8 日的抽灌-回 归-控排事件。

2.1 排水量、抽灌量和回归水量变化

试验区降水集中发生于 6 月 27 日一7 月 19 日, 合计降水量为 120.8 mm (图 4)。连续降水期间,田 间水层较高,不需要灌溉,抽灌事件发生较少。斗沟 蓄水超过下游涵洞沙袋高度外排,因此有连续排水事 件发生,排水量也较大。而在其他时间,降水较少且 农户多采用湿润灌溉(间歇淹水),田间水层保持的 较低(5 cm)。因此抽灌事件发生较多,而由于控排 措施的存在,灌排单元排水量较少。回归过程一般在 抽灌过程结束后 1~2 d 内完成,一般视田间湿润情况 而定。试验期间,共计监测排水 3 430.17 m³,抽灌回 归过程 24 次,平均每次抽灌水量 77 m³。这与 Hama 等^[9]在日本比瓦湖面流域 85.3%的结果相比稍大,原 因是本研究的灌排单元尺度与流域尺度相比,从稻田 到蓄水点回归距离较短,蒸发损失更少,且本研究生 育期降水量更大。

2.2 灌排单元内氮磷浓度变化特征研究

为分析循环灌溉回归过程从田间到农沟再到斗 沟氮磷污染物质量浓度的变化特征,选用标准差*S*和 标准差率V进行定量描述。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1} (X_i \cdot \overline{X})^2}{n}}, \quad (i=1, 2, \cdots, n), \quad (1)$$

式中: *S*为各污染物质量浓度标准差 (mg/L); *X_i*为各 污染物逐次实测质量浓度值 (mg/L); *X*为各污染物 逐次实测质量浓度均值 (mg/L); *n*为实测次数。

由于田间排水中氮磷污染物间质量浓度差异较 大,各污染物之间缺乏可比性,选用无量纲的统计函 数标准差率V来分析各污染物的变化幅度:

 $V = \frac{S}{\overline{X}^{\circ}}$

2 种沟别监测期内各类污染物质量浓度统计分析 结果见表 1 和图 4。

表1 农沟和斗沟氮磷污染物质量浓度评价指标

Table 1 Evaluation index of nitrogen and phosphorus

pollutant concentration in agricultural ditch and bucket ditch

沟别	污染物类别	评价指标				
		变化幅度/	均值/	标准差/	标准差率	
		$(mg L^{-1})$	$(mg L^{-1})$	(mg L ⁻¹)	初祖生十	
农沟	总磷	0.044~0.116	0.085	0.024	0.286	
	总氮	0.495~7.528	1.402	1.706	1.216	
	硝态氮	0.058~7.009	0.781	1.692	2.167	
	氨态氮	0.055~0.591	0.214	0.114	0.534	
斗沟	总磷	0.067~0.147	0.105	0.025	0.241	
	总氮	0.610~3.035	1.352	0.776	0.574	
	硝态氮	0.075~1.806	0.295	0.412	1.395	
	氨态氮	0.185~0.305	0.426	0.265	0.621	

结合表 1 和图 3, 斗沟的总磷、氨态氮质量浓度 均值大于农沟,总氮、硝态氮质量浓度小于农沟,其 中 2 种沟别氨态氮和硝态氮质量浓度均值差别较大。 2 种沟别总磷和氨态氮的标准差率差别不大,农沟的 总氮和硝态氮的标准差率大于斗沟。2 种沟别的 4 个 指标质量浓度均值从小到大分别是总磷、氨态氮、硝 态氮和总氮。2 种沟别的 4 个指标质量浓度标准差率 从小到大分别是总磷、氨态氮、总氮和硝态氮。另外, 雨水样品 4 个指标质量浓度均小于斗沟均值,表明降 水不会成为灌排单元的污染物负荷增量。



图 3 农沟和斗沟氮磷污染物质量浓度均值和标准差率 Fig.3 Mean and standard deviation of nitrogen and phosphorus pollutant concentration in agricultural ditch and bucket ditch



(2)

Fig.4 Statistical chart of drainage volume, pumping and irrigation volume and return water volume

从农沟到斗沟,总氮、硝态氮质量浓度均值减小 且标准差率也减小,表明农沟的质量浓度均值和波动 较大,稳定性不如斗沟,系最先接纳水田排水且水体 较少所致。总磷质量浓度均值和标准差率变化不大,

图 4 排水量、抽灌量和回归水量统计

说明2种沟别总磷都较为稳定。氨态氮质量浓度均值 从农沟到斗沟有较大增长,但标准差率变化不大,说 明农沟到斗沟氨态氮质量浓度增加,但是稳定性相同。 2.3 灌排单元氮磷污染物负荷变化研究

2.3.1 氮磷负荷计算

依据监测到的农沟和斗沟中氮磷质量浓度和水量, 根据平均浓度法计算原理^[22],应用式(3)分别计算监 测期间各次排水、抽灌和回归过程中所携带的负荷 W。

$$W = \overline{C} \int_0^t Q(t) dt = \overline{C}Q,$$
 (3)
式中: C为农沟和斗沟中氮磷污染物的质量浓度

(mg/L)。由于试验中是3d取样1次,计算过程中

为便于和水量对应,首先内插计算出每日农沟和斗沟 中氮磷污染物质量浓度; t为排水沟排水时段(s),本 例计算中以日为步长; Q(t)为排水、抽灌和回归流量 过程(m³/s); Q为斗沟日排水总量、每次抽灌总水量 和每次回归水总水量(m³)。其中,排水负荷和抽灌 负荷对应斗沟污染物质量浓度,回归负荷对应农沟污 染物质量浓度。

应用式(3)分别计算监测内总磷、总氮、硝态 氮和氨态氮的排水负荷、抽灌负荷和回归负荷分别见 图 5-图 8。



由图 3 和图 5 可得,总磷排水负荷和排水量变化 较相似,说明降水对总磷质量浓度的影响较小。在抽 灌回归过程中,每次的回归负荷均小于抽灌负荷,说 明水田和农沟对总磷起到了较好的截留和吸收效果。 但是抽灌负荷、回归负荷并没有随着次数增多而减少, 而是依旧与水量成正比,说明灌排单元中能随水流迁 移的总磷负荷并未大量减少,总磷负荷仍有外排的风 险,因此该模式对于总磷负荷的削减作用一般。

总氮大部分的回归负荷小于抽灌负荷,说明水田 和农沟对总氮起到了较好的削减作用。6月26日, 田间施尿素追肥,导致排水负荷和回归负荷大幅增加。 整个监测期间除了受追肥影响回归负荷大幅增加,总 氮抽灌负荷和回归负荷整体都在逐渐减少,说明灌排 单元中能随水流迁移的总氮存量也一直在减少,负荷 外排的风险也在减小。与总磷相比,抽灌-回归-控排 模式对整个灌排单元总氮负荷削减效果明显。连续降 水期间,排水量增加,总氮排水负荷逐渐下降,且连 续降水过后总氮抽灌负荷和回归负荷较降水之前明 显减少,说明降水期间,总氮质量浓度下降,一方面 是由于降水的稀释作用,另一方面是由于降水加快了 总氮的削减转化。

每次的抽灌-回归过程, 硝态氮回归负荷均高于 抽灌负荷,说明从农沟排出的硝态氮负荷多于从斗沟 抽灌的硝态氮负荷,回归水硝态氮质量浓度较抽灌水 质量浓度增加,表明田间的硝态氮质量浓度较斗沟更 高,说明在抽灌-回归-控排模式中,回归水将田间硝 态氮负荷带入斗沟中, 硝态氮的削减发生在斗沟中而 非田间和农沟。追肥后,斗沟的排水负荷和回归负荷 增加较多,系6月26日田间追肥,农沟质量浓度达 到监测期间最高值 7.528 mg/L 所致。连续降水过后, 硝态氮的抽灌负荷和回归负荷都大幅减少,同总氮负 荷规律相似,表明硝态氮质量浓度受降水影响大幅下 降。虽然硝态氮负荷削减的场所在斗沟,而非田间和 农沟,但整体上硝态氮抽灌负荷和回归负荷都在逐渐 减少,说明灌排单元中能随水流迁移的硝态氮存量也 一直在减少,负荷外排的风险也在减小,抽灌-回归-控排模式对整个灌排单元硝态氮负荷削减效果明显。

每次的抽灌回归过程,氨态氮回归负荷都在抽灌 负荷的 1/2 以下,与另外 3 种负荷相比,田间和农沟 对抽灌水中氨态氮负荷的截留和削减作用最为明显。 整体上氨态氮抽灌负荷和回归负荷都在逐渐减少,但 与总氮、硝态氮相比,减少幅度不大,说明灌排单元 能随水流迁移的氨态氮存量有减少但不明显,负荷仍 有外排的风险,抽灌-回归-控排模式对整个灌排单元 氨态氮负荷削减效果一般。

2.3.2 氮磷负荷削减变化分析

将 24 次抽灌回归过程的氮磷污染物抽灌负荷和 回归负荷累加汇总。各水量、负荷统计汇总见表 2。

表 2 各水量负荷统计汇总表

Table 2 Statistical summary of water los
--

项目	抽灌量	回归量	减少量	单位面积 减少量/ (kg hm ⁻²)	削减率/%
水量/m ³	1 848.62	1 662.41	186.21	-	-
总磷负荷/g	184.68	117.27	67.41	0.28	36.50
总氮负荷/g	3 473.57	2 675.65	797.92	3.27	22.97
硝态氮负荷/g	624.62	1 198.22	-573.59	-2.35	-91.83
氨态氮负荷/g	1 096.10	522.88	573.23	2.35	52.30

注 计算抽灌、回归的负荷总减少量和削减率是按照斗沟抽灌负荷为初 始量、农沟回归负荷为结束量。其中,正负号代表不同的削减场所,正值 代表削减过程发生在田间和农沟,负值代表削减过程由于发生在斗沟,并 非灌排单元负荷增长。

总磷、总氮、硝态氮和氨态氮的总削减率分别为 36.50%、22.97%、-91.83%和 52.30%。绝对值越大代 表削减效果越好,则 4 种负荷硝态氮削减效果最好, 其余依次为氨态氮、总磷和总氮。氨态氮的减少量与 硝态氮的增加量几乎相等,但总氮减少 22.97%,表 明循环灌溉对有机氮削减效果较好。本研究整个生育 期削减的总磷、总氮负荷分别为 0.28、3.27 kg/hm², 少于 Feng 等^[7]0.37、3.98 kg/hm²的结果,可能是由于 本研究每次灌水后田间水停留时间为 2~3 d,短于上 述研究的 4~7 d,且 Feng 等^[7]的研究中降水后未向下 游排水,本研究中雨季灌排单元向下游排水,灌排单 元负荷总量减少,削减量也有所减少。

各负荷硝态氮和氨态氮占总氮的比例如图 9 所 示,抽灌负荷氨态氮占比最大,为 44.78%,表明斗 沟含氮污染物中氨态氮占比较多。回归负荷硝态氮占 比最大,为 31.56%,表明农沟含氮污染物中硝态氮 占比较多。而排水负荷属于降水后斗沟排水,其中硝 态氮和氨态氮占比差不多,表明控排措施使得的降水 后斗沟排水负荷中的硝态氮和氨态氮达到了稳定。





Fig.9 Proportion of different forms of nitrogen in each load

在抽灌-回归-控排模式中,总磷、总氮、氨态氮 负荷的削减是在田间和农沟中发生的,硝态氮负荷的 削减是在斗沟中发生的。抽灌-回归-控排模式一方面 通过抽灌和回归使得污染物消除减少,一方面通过控 排措施减少负荷外排,表明该模式对于灌排单元污染 物削减效果较好,且降低了沟渠排水给下游水体带来 的风险。

每次抽灌-回归过程各负荷的削减率和回归率见 图 10。总磷的削减率变化最为稳定, 硝态氮的削减 率变化最不稳定。6月21日、27日,氨态氮和硝态 氮出现了明显的反向变化,系硝化作用氨态氮大量转 化成硝态氮所致。监测期间一共有8次抽灌回归过程 回归率超过了100%,即回归量超过了抽灌量,其中 5次造成了各负荷削减率的大幅下降,表现了回归量 增大对于回归负荷增加的影响。



Fig.10 Variation diagram of reduction rate and regression rate of irrigation regression process of various pollutants

2.3.3 抽灌-回归-控排特征对削减率的影响

各污染物削减率波动较大(图10),而影响其波 动的因素较多。在循环灌溉中,田间水经过侧渗、自 流进入农沟,再从农沟自流进入斗沟,经过斗沟充分 稀释,又被抽灌至田间。水流运动既有自然状态下的 自流和侧渗,又有人工干预的抽灌,影响因素错综复 杂。在此过程中,气象特征如温度、降水量,回归特 征如回归时长、回归水量等都会对负荷削减产生不同 程度的影响,而且各因子之间会有一定的相关性,并 通过削减率反映出来。本研究选择气象、回归相关变 量进行了皮尔逊相关分析。其中回归特征因子选用削 减率 *E*、回归率 *R*(回归水量/抽灌水量)、回归时长 *H*、质量浓度之比 *C*(回归质量浓度/抽灌质量浓度); 气象特征因子选用平均温度 *T*、抽灌当天及第 2 天降 水量 *P*。

表 3 气象、回归变量多元相关分析 Table 3 Multivariate correlation analysis of

rable 5	winner	conclation	anarysis	oı

meteorological and regression variables						
Ε	Р	Т	R	Н	С	
总磷	-0.284	-0.172	-0.513*	-0.165	-0.769**	
总氮	-0.360*	-0.037	-0.189	0.163	-0.713**	
硝态氮	-0.349*	-0.426*	-0.272	-0.203	-0.816**	
氨态氮	0.182	0.247	-0.363*	-0.136*	-0.893**	

注 *表示在 0.05 水平上显著相关; **表示在 0.01 水平上显著相关。

从表 3 可以看出,4 种负荷削减率都与其质量浓 度之比相关性最好,呈显著负相关,即回归负荷质量 浓度越低,回归负荷量越低,削减率越高。总磷和氨 态氮削减率与回归率显著负相关,因为总磷和氨态氮 质量浓度波动都较小,所以削减率和回归水量负相关。 氨态氮削减率还与回归时长显著负相关,表明回归水 在田间停留时间越短,回归水流速越快,水流紊动作 用更强,越容易形成富氧环境,氨态氮削减效果越好。 总氮、硝态氮削减率与抽灌当天及第2天降水量显著 负相关,表明降水导致硝态氮回归负荷增加,造成硝 态氮削减率下降。同时,降水造成总氮抽灌负荷减少, 总氮削减率下降。硝态氮削减率还与温度显著负相关, 表明温度越高,反硝化越易发生,削减效果越好。另 外,温度和回归时长正相关,表明温度越高,田间和 农沟水蒸发量越大,所需回归时间也越长。

为了更好地了解循环灌溉中削减率的动态变化, 在多元相关分析的基础上,采用逐步回归方法分析各 负荷削减率的主控因子,得出总磷(TP)、总氮(TN)、 硝态氮(NN)和氨态氮(AN)削减率的函数关系式 分别为:

$$\begin{split} E_{\rm TP} =& -0.668 R_{\rm TP} - 1.037 C_{\rm TP} + 1.629 \\ & (R^2 =& 0.994, Sig < 0.01) , \\ E_{\rm TN} =& -1.426 C_{\rm TN} - 0.02 P_{\rm TN} + 1.725 \\ & (R^2 =& 0.767, Sig < 0.01) , \\ & E_{\rm NN} =& -0.802 C_{\rm NN} + 2.674 \\ & (R^2 =& 0.816, Sig < 0.01) , \\ & E_{\rm AN} =& -0.97 C_{\rm AN} - 0.681 R_{\rm AN} + 1.697 \\ & (R^2 =& 0.970, Sig < 0.01) , \end{split}$$

可知回归率、总磷质量浓度之比是总磷负荷削减 率的主控因子;总氮质量浓度之比、抽灌当天及第2 天降水量是总氮负荷削减率的主控因子;硝态氮质量 浓度之比是硝态氮负荷削减率的主控因子,氨态氮质 量浓度之比、回归率是氨态氮负荷削减率的主控因子。

3 讨论

湖北地区的水稻灌溉方式一般分为 3 种^[23],"浅 湿晒"灌溉、湿润灌溉(轻度间歇淹水^[24])和传统淹 灌。"浅湿晒"模式能够实现节水、提高水分生产率, 但产量会降低了 4%~5%^[25],农民接受度较低。湿润 灌溉和传统淹灌应用较多。其中湿润灌溉(返青期 0-10-30 mm、分蘖前期 0-20-30 mm、田间存在短暂落 干)产量稍高于传统淹灌且灌水量可减少 23.8%^[26]。 本研究中平均每次抽灌量为 77 m³,折合田间水层 31.5 mm,每次抽灌完待自由落干后再次抽灌,间隔 2~3 d,属于上述湿润模式。整个生育期仅泡田期消 耗灌水 75 mm 及斗沟蓄水消耗水量 44 mm, 灌排单 元净灌溉定额为119 mm,为本地区传统淹灌净灌溉 定额 229.6 mm^[27]的 51.8%, 节水效果良好, 且满足 湿润灌溉要求产量未受影响。节水的原因一方面是通 过控排措施对降水、田间排水和渗漏水的拦截、重复 利用,提高了降水和排水的利用率,另一方面是湿润 模式的低田间水层和短暂落干使得水分胁迫的程度 和持续时间也越长,减少了田间水分的无益损耗(蒸 发和下渗)^[28-29],前者为主要原因。

除了田间径流造成水稻田水肥损失外,通过田埂 侧渗的损失也不容忽视^[30-31]。Liang 等^[32]通过设置侧 渗液收集装置发现,稻田每年经田埂侧渗水量和损失 氮量为 317 mm 和 6.8~25.6 kg/hm^{2[33]}。本研究中的湿 润灌溉方式使得田间存在短暂落干,减少了水肥侧渗 量,且农沟深 50 cm,能较好地收集侧渗损失的水肥, 并通过循环灌溉中重复利用吸收,提高了水肥利用率。

漳河灌区塘堰和各级灌排渠系面积占灌区总面积 13.4%和 7.3%。塘堰星罗棋布、大小水库众多、各级渠道纵横交错促成了灌区从邻近蓄水体抽灌这一特有的灌溉方式。抽灌过程持续时间较短且通过管道,较渠道逐级自流的输水灌溉方式,操作简单方便,在塘堰沟渠众多的丘陵灌区较为普遍,抽灌几乎无水量损耗,从提高灌溉水利用系数的角度也值得提倡。本研究灌溉面积 2 440 m²,斗沟最大容蓄量为 120 m³(按斗沟水深 0.5 m 计算),生育期斗沟最低水位0.05 m,泡田期后未从区域外引水灌溉。需要说明的是,排水再利用的可行性及效果与不同地区灌溉方式及地理特征有关,进行排水再利用模式推广时一定要充分考虑当地的气候与水利设施条件才能找到适合的节水减排的灌溉模式。

4 结 论

1) 将丘陵灌区较为普遍的排水循环灌溉分为抽 灌、回归和控排3个环节,生育期共计监测抽灌-回归 过程24次,抽灌水量1848.62 m³,回归水量1662.41 m³, 回归率为89.93%。灌排单元净灌溉定额为本地区传统 淹灌净灌溉定额的51.8%,节水效果良好。

2)负荷削减效果最好的是硝态氮,依次是总氮、

氨态氮和总磷。总磷、总氮、氨态氮负荷的削减是在 田间和农沟中发生的,硝态氮负荷的削减是在斗沟中 发生的。总氮中有机氮的削减较多。控排措施使得的 降水后排水负荷中的硝态氮和氨态氮达到了稳定。循 环灌溉提高了水肥利用率,减少不必要的负荷外排, 灌排单元减排效果良好。

3)通过对气象因子和回归因子进行皮尔逊相关 分析和逐步回归,得出4种负荷削减率都与各负荷质 量浓度之比相关性最好,总磷和氨态氮削减率与回归 率呈显著相关,总氮、硝态氮削减率与抽灌当天及第 2天降水量呈显著相关,硝态氮削减率还与温度呈显 著相关。回归率、质量浓度之比是总磷负荷削减率的 主控因子;质量浓度之比、抽灌当天及第2天降水量 是总氮负荷削减率的主控因子;质量浓度之比是硝态 氮负荷削减率的主控因子,质量浓度之比、回归率是 氨态氮负荷削减率的主控因子,且均为负相关。

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, 2008, 19(2): 294-300.
 DAI Junfeng, CUI Yuanlai. Progress in study of the irrigation hydrology[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 294-300.
- [2] 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, 2010, 26(10): 56-62.
- [3] 王少丽,许迪,刘大刚. 灌区排水再利用研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 42-48, 28.
 WANG Shaoli, XU Di, LIU Dagang. Research progress on drainage water reuse in irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 42-48, 28.
- [4] SHARMA Bharat R, MINHAS P S. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia[J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1/2): 136-151.
- [5] FLEIFLE Amr E, SAAVEDRA VALERIANO O Oliver C, NAGY Hossan M, et al. Simulation-optimization model for intermediate reuse of agriculture drainage water in Egypt[J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139(3): 391-401.
- [6] 崔远来,张新,罗玉峰,等. 稻田回归水模拟及其评价[J]. 灌溉排水 学报, 2005, 24(5): 1-4. CUI Yuanlai, ZHANG Xin, LUO Yufeng, et al. Simulation and evaluation of return flow in rice paddy[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(5): 1-4.
- [7] FENG Y W, YOSHINAGA I, SHIRATANI E, et al. Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system[J]. Agricultural Water Management, 2004, 68(1): 47-60.
- [8] HAMA Takehide, NAKAMURA Kimihito, KAWASHIMA Shigeto, et al. Effects of cyclic irrigation on water and nitrogen mass balances in a paddy field[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(10): 1 563-1 566.
- [9] HAMA Takehide, AOKI Takeru, OSUGA Katsuyuki, et al. Reducing the phosphorus effluent load from a paddy-field district through cyclic irrigation[J]. Ecological Engineering, 2013, 54: 107-115.
- [10] TAKEDA Ikuo, FUKUSHIMA Akira. Long-term changes in pollutant

load outflows and purification function in a paddy field watershed using a circular irrigation system[J]. Water Research, 2006, 40(3): 569-578.

- [11] 焦平金,许迪,朱建强,等. 排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3 842-3 849.
 JIAO Pingjin, XU Di, ZHU Jianqiang, et al. Temporal and spatial distribution of phosphorus in paddy fields under cyclic irrigation of drainage water[J]. Environmental Science, 2016, 37(10): 3 842-3 849.
- [12] 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, 2016, 32(11): 138-143.
- [13] 朱成立,郭相平,刘敏昊,等. 水稻沟田协同控制灌排模式的节水减 污效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 86-91.
 ZHU Chengli, GUO Xiangping, LIU Minhao, et al. Reduction of nitrogen, phosphorous and runoff by coordination controlled drainage with basin and ditch in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 86-91.
- [14] NEGM Lamyaa M, YOUSSEF Mohamed A, JAYNES Dan B. Evaluation of DRAINMOD-DSSAT simulated effects of controlled drainage on crop yield, water balance, and water quality for a corn-soybean cropping system in central Iowa[J]. Agricultural Water Management, 2017, 187: 57-68.
- [15] YOUSSEF Mohamed A, ABDELBAKI Ahmed M, NEGM Lamyaa M, et al. DRAINMOD-simulated performance of controlled drainage across the US Midwest[J]. Agricultural Water Management, 2018, 197: 54-66.
- [16] 王友贞,王修贵,汤广民.大沟控制排水对地下水水位影响研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6):74-77.
 WANG Youzhen, WANG Xiugui, TANG Guangmin. Effects of controlled drainage of main ditch on groundwater table[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 74-77.
- [17] 王友贞,于凤存,沈涛.淮北平原区干沟控制排水技术及效应[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 104-110.
 WANG Youzhen, YU Fengcun, SHEN Tao. Study on the technique and effect of controlled drainage through the main drainage ditch[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 104-110.
- [18] 谢阳村, 徐敏, 高世凯, 等. 基于 DRAINMOD 模型的不同灌排模式 稻田水氮运移模拟[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 37-44. XIE Yangcun, XU Min, GAO Shikai, et al. Using DRAINMOD to simulate the impact of irrigation and drainage on reaction and movement of water and nitrogen in paddy field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 37-44.
- [19] 李强坤, 胡亚伟, 孙娟, 等. 控制排水条件下农业非点源污染物流失特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 182-187.
 LI Qiangkun, HU Yawei, SUN Juan, et al. Loss characteristics of agricultural non-point source pollutants under controlled drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S2): 182-187.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.灌溉渠道 系统量水规范:GB/T 21303—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [21] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会编.水和废水监

测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[22] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学 学报, 2000, 20(4): 397-400.

LI Huaien. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(4): 397-400.

[23] 刘路广,谭君位,吴瑕,等.鄂北地区水稻适宜节水模式与节水潜力[J]. 农业工程学报,2017,33(4):169-177.

LIU Luguang, TAN Junwei, WU Xia, et al. Reasonable irrigation mode and water-saving potential for rice in Northern Hubei Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 169-177.

 [24] 茆智.水稻节水灌溉及其对环境的影响[J].中国工程科学, 2002, 4(7): 8-16.

MAO Zhi. Water saving irrigation for rice and its effect on environment[J]. Engineering Science, 2002, 4(7): 8-16.

- [25] CARRIJO Daniela R, LUNDY Mark E, LINQUIST Bruce A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 173-180.
- [26] 姚林,郑华斌,刘建霞,等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1 381-1 387.
 YAO Lin, ZHENG Huabin, LIU Jianxia, et al. Current situation and prospect of rice water-saving irrigation technology in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1 381-1 387.
- [27] 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. Comparision of irrigation efficiency under different scales[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010,29(1):5-10.
- [28] 钱晓晴, 沈其荣, 徐勇, 等. 不同水分管理方式下水稻的水分利用效率与产量[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 399-404.
 QIAN Xiaoqing, SHEN Qirong, XU Yong, et al. Water use efficiency and rice yield under different water managements[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(3): 399-404.
- [29] 季飞, 付强, 王克全, 等. 不同水分条件对水稻需水量及产量影响[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 82-85.
 JI Fei, FU Qiang, WANG Kequan, et al. Effects of different water supply on water demand and yield of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(5): 82-85.
- [30] JANSSEN Manon, LENNARTZ Bernd. Water losses through paddy bunds: Methods, experimental data, and simulation studies[J]. Journal of Hydrology, 2009, 369(1/2): 142-153.
- [31] JANSSEN Manon, LENNARTZ Bernd. Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(1): 133-141.
- [32] LIANG Xinqiang, LI Hua, CHEN Yingxu, et al. Nitrogen loss through lateral seepage in near-trench paddy fields[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(2): 712-717.
- [33] LIANG Xinqiang, YUAN Junli, HE Miaomiao, et al. Modeling the fate of fertilizer N in paddy rice systems receiving manure and urea[J]. Geoderma, 2014, 228/229: 54-61.

Reusing Effluent Water in Drainage Ditches for Irrigation in Hilly Regions

SHAO Peiyin^{1,2}, LI Yalong², XIONG Yujiang², YUAN Niannian², SU Peilan^{1*}

(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)

Abstract: [Objective] Most hilly regions in China are short of freshwater resources and recycling the effluent water in their drainage ditches is a way to relieve this pressure and improve water use efficiency. This paper investigates

how reusing the effluent water for irrigation affects leaching of nitrogen (N) and phosphorus (P) from soils. [Method] In-situ experiment was set up in a field to measure the change in water flow and N and P concentrations in the ditches and the ditch buckets. We calculated the ratio of recycled water volume to the volume of water pumped for irrigation (i.e., regression rate), as well as the change in N and P pollutant loads and their determinants. [Result] The water had been drained and reused for irrigations for 24 cycles during the growing season, and the total regression rate reached 89.93%. The loads of total P, total N, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen during the growing season were 0.28, 3.27, 2.35 and 2.35 kg/hm², respectively. The load reductions of P and N were correlated with the ratio of their concentrations in the effluent and in the irrigation water. The reduction in total P and ammonia was significantly correlated with the regression rate. The reduction in total N and nitrate was significantly correlated with irrigation and rainfall in the second day after the irrigation. Nitrate reduction rate was also significantly correlated with temperature. [Conclusion] The cycles of drainage and its reuse for irrigation not only saves water but also improves utilization of water and fertilizers, thereby reducing the risk of N and P pollution to the downstream.

Key words: hilly irrigated area; circular irrigation; nitrogen and phosphorus load; rice; water saving and pollutant reduction

责任编辑:白芳芳

(上接第122页)

Improving Wastewater-treatment Wetlands by Exogenous Carbon Earthworms

HAO Yiting^{1,2}, GAO Feng^{1,3*}, MA Huanhuan⁴, MA Tian^{1,2}, HU Chao^{1,3}, LIU Chuncheng^{1,3}, CUI Erping^{1,3}

(1. Institute of Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Efficient and Safe Utilization of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 4. College of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: [Objective] Constructed wetland is a biotechnological technique to treat wastewater; its function depends on a multitude of biotic and abiotic factors. This paper compares the performance of eight wetlands constructed by different materials. [Method] The eight wetlands we studied were constructed by fine sand only (CK), fine sand + corn straw powder (JW), fine sand + industry glucose (PW), sand + corn-straw biochar (SW), fine sand + eisenia fetida (KQ), fine sand + corn straw powder + eisenia fetida (JQ), fine sand + industrial glucose + eisenia fetida (PQ), fine sand + corn stover biochar + eisenia fetida (SQ), respectively. [Result] Adding corn-straw biochar, industrial glucose and corn-straw power increased the COD removal rate by 81.80%, 88.58% and 85.77%, respectively, compared to CK. Adding industrial glucose combined with corn straw powder improved purification efficiency of total N (TN) and total P (TP) by 7.0% and 2.8%, respectively. Wetland with industrial glucose and corn straw powder had the best TN removal rate, reaching 98% and 98.2%, respectively. Adding corn-straw power along with eisenia fetida to the wetlands increased the removal rates of COD, Cu and Zn by 1.8%, 6.3% and 2.6%, respectively, while adding corn-stover biochar significantly increased the removal rate of NH₄⁺-N. Compared with corn straw powder and corn straw biochar, industrial glucose was more efficient for removing COD, total N and N, and Cu.

【Conclusion】 Adding eisenia fetida and organic carbon to the wetland can improve its efficacy to remove COD, nitrogen and heavy metals, especially corn-stover powder combined with eisenia fetida. For removing Cu, corn straw powder combined with eisenia fetida works the best.

Key words: constructed wetland; Children love worms; carbon source; aquaculture wastewater

责任编辑:赵宇龙