排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2022 年 8 月 Aug. 2022 | 第 40 卷 第 8 期 Vol.40 No.8

再生水灌溉对稻田重金属分布的影响


王磊

王磊[1*]，周璐瑶[2]，胡静博[3]，蔡佳坊[1]，
王伟[4]，肖万川[1]，何妙妙[5]

（1. 浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院），浙江 杭州 310020；2. 浙江省水资源水电管理中心（浙江省水土保持监测中心），浙江 杭州 310000；3. 杭州萧山水利水电勘察设计有限公司，浙江 杭州 311200；4. 杭州市余杭区西部水利综合服务中心，浙江 杭州 311100；5. 苏州市吴中区水务局，江苏 苏州 215104）

摘要：以南方稻田为研究对象，以再生水安全灌溉调控为目标，基于田间试验，研究了不同灌溉水源（农村生活污水一级处理水 R1、二级处理水 R2、生态塘净化水 R3 和河道清水 R4）、不同灌溉调控（低水位 W1、中水位 W2 和高水位 W3）对土壤-作物典型重金属（镉 Cd、铅 Pb、铬 Cr、铜 Cu、锌 Zn）质量比变化的影响，分析了农村生活再生水灌溉调控对土壤重金属生态风险.研究表明，农村生活污水再生灌溉稻田 Cd，Pb 质量比略有升高，Cr，Cu，Zn 含量下降；水稻植株各部分器官重金属质量比按植株器官排序从大到小依次为茎，稻米≈叶，重金属组成从大到小依次为 Zn，Cr，Pb，Cd，相对灌溉水源，水位调控对水稻植株各部分器官重金属质量比累积影响较小，再生水灌溉条件下水稻籽粒重金属质量比并未明显增加，符合稻谷污染物的限量要求；农村生活污水再生灌溉稻田 Cd 生态风险系数最高，Cu 和 Pb 次之，Cr 和 Zn 风险系数较低，R3 水源灌溉下土壤重金属污染潜在生态风险最低，总体上，再生水灌溉并未对土壤造成严重污染，但长期进行再生水灌溉是否会造成重金属污染风险持续增加有待研究.

关键词：农村生活再生水；稻田水位调控；重金属；生态风险分析
中图分类号：S274.1　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2022)08-0842-08
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.21.0285　**开放科学（资源服务）标识码（OSID）**：

王磊，周璐瑶，胡静博，等. 再生水灌溉对稻田重金属分布的影响[J].排灌机械工程学报，2022，40(8)：842-849.

WANG Lei，ZHOU Luyao，HU Jingbo，et al. Effects of reclaimed water irrigation on the distribution of heavy metal in paddy fields [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2022，40(8)：842-849.(in Chinese)

Effects of reclaimed water irrigation on the distribution of heavy metal in paddy fields

WANG Lei[1*]，*ZHOU Luyao*[2]，*HU Jingbo*[3]，*CAI Jiafang*[1]，*WANG Wei*[4]，*XIAO Wanchuan*[1]，*HE Miaomiao*[5]

（1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planing and Design)，Hangzhou，Zhejiang 310020，China；2. Zhejiang Water Resources and Hydropower Management Center (Zhejiang Water and Soil Conservation Monitoring Center)，Hangzhou，Zhejiang 310000，China；3. Hangzhou Xiaoshan Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Co.，Ltd.，Hangzhou，Zhejiang 311200，China；4. Hangzhou Yuhang District West Water Conservancy Comprehensive Service Center，Hangzhou，Zhejiang 311100，China；5. Water Affairs Bureau in Wuzhong District，Suzhou，Jiangsu 215104，China）

Abstract：Based on the field experiment，the paddy field in South China was taken as the research object，aiming at the safe irrigation regulation of reclaimed water，the effects of different irrigation water sources (rural domestic sewage primary treatment water R1，secondary treatment water R2，ecological

收稿日期：2021-10-15；修回日期：2022-04-07；网络出版时间：2022-07-13
网络出版地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20220711.1740.018.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFC0408803)
第一作者简介：王磊(1990—)，男，浙江杭州人，工程师(通信作者，wanglei0704@zjwater.gov.cn)，主要从事农业水土环境研究.
第二作者简介：周璐瑶(1991—)，女，浙江杭州人，工程师(miya.chou@163.com)，主要从事农村水利水电研究.

pond purified water R3 and river water R4) and irrigation regulations (low water level control W1, medium water level control W2 and high water level control W3) on the changes of typical heavy metals (Cd, Pb, Cr, Cu, Zn) in soil and crops were studied, and the ecological risk of rural domestic reclaimed water irrigation regulation on soil heavy metals was analyzed. The results show that the contents of Cd and Pb are increased slightly, but the contents of Cr, Cu and Zn are decreased in paddy field. The contents of heavy metals in rice organs are shown that stem> grain≈leaf. The composition of heavy metals is shown that Zn>Cr>Pb>Cd. Compared with irrigation water sources, water level regulation has little effect on the accumulation of heavy metals in rice organs. The content of heavy metals in rice grain is not increased significantly under reclaimed water irrigation, which meets the limit requirements of pollutants in rice grains. The ecological risk coefficient of Cd in paddy fields under rural domestic sewage reclaimed irrigation is the highest, followed by that of Cu and Pb, the risk coefficient of Cr and Zn is relative lower, and the potential ecological risk under R3 water sources is the lowest. In general, serious pollution to paddy field is not caused by reclaimed water irrigation, but whether a continuous increase in the risk of heavy metal pollution will be caused remains to be studied by long-term reclaimed water irrigation.

Key words: rural domestic reclaimed water; paddy field water level regulation; heavy metals; ecological risk analysis

当前全球水资源供需矛盾日益加剧,污水资源化代替部分新鲜水用于农业灌溉,可以在一定程度上节约水资源,成为缓解局部地区水资源短缺、水质型缺水的重要举措[1-3].目前,中国约有 10%的耕地采用再生水进行农业灌溉,并取得了较好的利用成效[4].相比城市污水,农村生活污水 N,P 元素含量较高,重金属污染物等毒理指标量低,可生化性良好,可作为一种传统的水肥资源,经安全处理后灌溉回用,可以有效减排污染物,降低新鲜水资源的取用量[5-6].再生水灌溉引起的重金属污染问题是其回用研究和应用广泛关注的热点问题,重金属迁移转化存在各种物理、化学、生物等复杂行为特征[7-9].农村生活污水中常见重金属包括 Cu,Cr,Pb,Cd,Zn,浓度通常在 5 ug/L 以下,其中 Cr 和 Cd 生态风险最高[10-12].栗岩峰等[13]提出采用滴灌或分根交替灌溉技术较常规灌溉可以显著降低土壤中重金属含量.LI 等[14]研究表明重金属在作物各部位累积存在较大差异,籽粒中最低,根茎叶系统对重金属向果实迁移起到屏障作用.窦韦强等[15]研究表明,中短期再生水灌溉回用土壤重金属污染的生态风险较低,但会导致 20~40 cm 土层重金属含量增加,长期再生水灌溉回用有可能造成土壤中重金属的累积.因此,研究再生水灌溉对土壤-作物重金属分布的影响,评估土壤重金属风险,对控制农村耕地环境污染、维护中国农田的土壤安全性能和制定再生水灌排策略,具有科学研究价值和现实意义[16-17].基于此,文中以稻田作为研究对象,研究农村生活再生水灌溉调控下,稻田、作物植株器官典型重金属含量变化规律,分析稻田重金属含量与土壤环境质量的关系,评估再生水灌溉对稻田土壤重金属风险的影响.

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2020 年、2021 年 5 月至 11 月,在浙江省金华节水型试点试验基地开展,试验区位于金华市永康市舟山镇集镇区舟三村(120°10′E ,28°48′N),属低山丘陵地区,为亚热带季风气候,四季分明,日光充足,雨量充沛,年内降雨分布不均匀,年均降水量为 1 787 mm.研究区域共建有 36 个水稻标准试验小区(规格 20 m×5 m),试验小区田埂高度不低于 30 cm,田埂顶宽为 60 cm,边坡为 1∶0.5,采用土工膜防止各试验小区之间水量侧渗.采用管道输水灌溉.试验区域已建有一座设计规模为 400 m^3/d 的农村生活污水处理站,其为本研究的污水水源,处理工艺采用二级生物处理工艺(一级处理为常规工艺,二级处理采用改良 A^2O 工艺),出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准.试验区土壤为砂黏土,不同土层理化性质指标见表 1,其中 h 为土层高度,pH,EC,$w_{(TN)}$,$w_{(TP)}$,$w_{(OM)}$,$w_{(NH_4^+-N)}$,$w_{(NO_3^--N)}$分别为土壤酸碱度、土壤电导率、土壤总氮质量分数、总磷质量分数、有机质质量比、铵态氮质量比、硝态氮质量比.

表 1 试验小区土壤基本物理性质

Tab.1 Physical and chemical properties of soil layers

h/cm	pH	EC/(mS·m^{-1})	$w_{(TN)}$/%	$w_{(TP)}$/%	$w_{(OM)}$/(g·kg^{-1})	$w_{(NH_4^+-N)}$/(g·kg^{-1})	$w_{(NO_3^--N)}$/(g·kg^{-1})
[0,20)	5.6	2.6	0.12	0.07	17.7	8.24	2.84
[20,40)	5.9	2.9	0.12	0.07	17.7	8.24	2.84
[40,60)	6.2	2.8	0.09	0.03	14.8	5.75	2.69
[60,80]	6.6	2.8	0.07	0.03	12.9	4.71	2.50

1.2 试验设计

试验设置 4 种灌溉水源,分别为污水处理站一级出水 R1、二级出水 R2、生态塘水 R3(二级处理单元出水深度处理后存储于生态塘,蓄水容积 6 000 m^3)、舟山溪水(河道清水)R4,通过 4 座简易潜水泵提水灌溉.2020 年,生态塘建设未完成,灌溉水源为 R1,R2,R4 共计 3 种,2021 年,灌溉水源为 R1,R2,R3,R4 共计 4 种,各灌溉水源水质指标均达到灌溉水质标准(GB 5084—2021).设置 3 种水位调控处理,分别为低水位调控 W1、中水位调控 W2 和高水位调控 W3,各处理 3 个重复,田间水位控制标准见表 2,试验场地示意图见图 1.水稻供试品种为单季水稻嘉优中科 13-1,施肥方式按照当地施肥习惯,采用基肥+追肥方式.

表 2 田间水位控制标准

Tab.2 Field water level control standard mm

水位调控	上下限	返青	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
W1	灌溉下限	0	露田 3~5 d	露田 1~2 d	露田 1~2 d	露田 1~2 d	露田 3~5 d
	灌溉上限	30	30	晒田	40	40	30
	蓄污(雨)上限	50	70		80	80	60
W2	灌溉下限	0	10	10	10	10	10
	灌溉上限	30	50	晒田	50	50	50
	蓄污(雨)上限	50	70		100	100	100
W3	灌溉下限	0	40	40	40	40	10
	灌溉上限	30	60	晒田	60	60	60
	蓄污(雨)上限	50	100		150	150	100

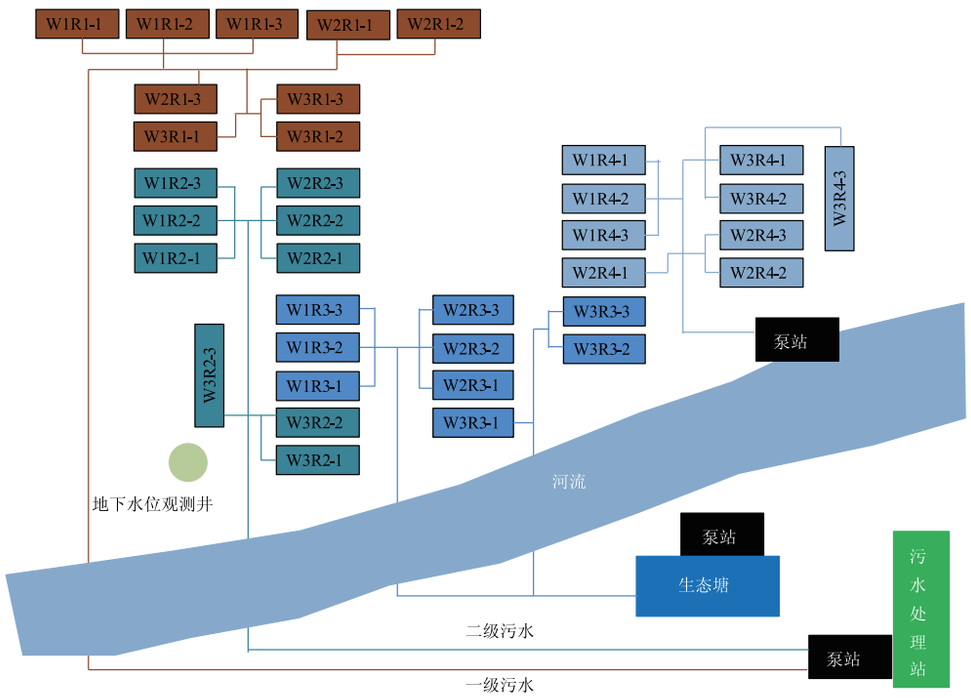


图 1 试验区田间布置图

Fig.1 Field layout of experimental area

1.3 测定指标及方法

在水稻种植前后分别对 0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,60~80 cm 土层进行取样,测定稻田土壤中 5 种典型重金属元素(镉 Cd,铅 Pb,铬 Cr,铜 Cu,锌 Zn)含量,其中 Cd 含量采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,Pb,Cr,Cu,Zn 含量采用火焰原子吸收分光光度法测定.在水稻收割后,对水稻植株进行取样,分别测定茎、叶、籽粒中重金属含量,其中 Cu,Zn 采用火焰原子吸收光谱法测定,Pb,Cr,Cd 采用电感耦合等离子体质谱法测定.

2 结果与分析

2.1 稻田土壤重金属含量变化

不同灌溉水源和水位调控下稻田各土层重金属质量比 W 变化如图 2 所示.

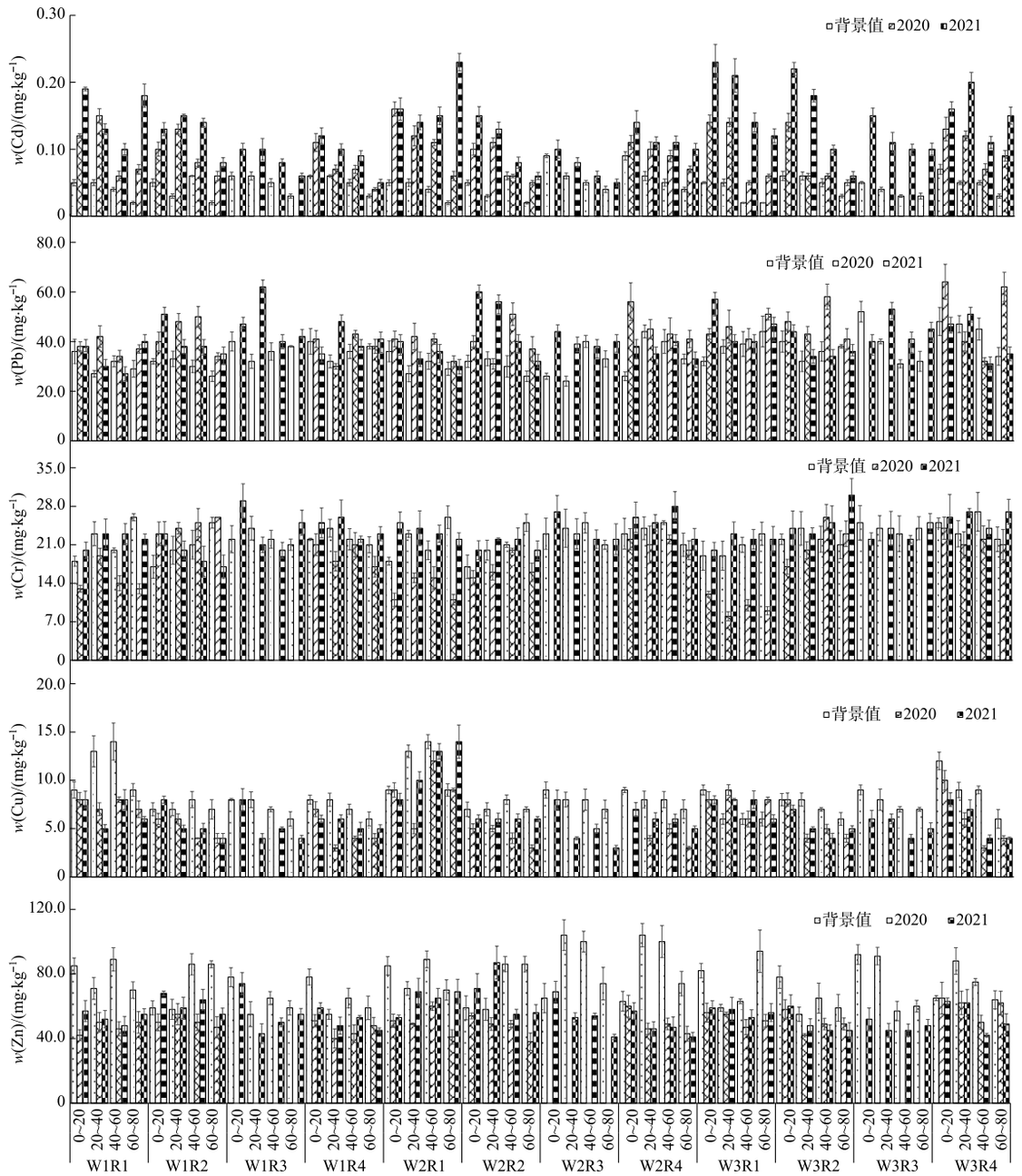


图 2　不同灌溉水源和不同水位调控下稻田重金属质量比变化

Fig.2　Changes of heavy metal content in paddy fields under different irrigation water sources and different water level regulations

Cd 质量比在土壤表层中质量比明显高于深层,这是由于 Cd 在土壤中的移动性较小,容易在土壤上层积累.R1 水源灌溉下各土层 Cd 质量比增幅最大,R2 其次,R3 水源下增幅最小,可见一二级再生水灌溉下土壤中 Cd 质量比增加明显.稻田各土层土壤 Pb 质量比,随着田间水位增加呈现升高趋势,不同水源条件下稻田 Pb 质量比变化较大.对 Cr 质量比变化,2020 年除处理 W1R2 和 W3R2 土壤 Cr 质量比升高外,其余处理土壤内 Cr 质量比均下降,2021 年与背景值相比总体有所升高.低水位 W1 调控下土壤中 Cr 质量比降低较小,随着灌溉时间增加,土壤 Cr 质量比变化显著.2020 年、2021 年农村生活再生水灌溉调控下各处理土壤中 Cu 质量比均未升高,呈现下降趋势.中低水位调控下,稻田 Cu 质量比与背景值相比降幅较大,高水位下降幅较小.与 Cu 质量比变化类似,土壤 Zn 质量比呈现下降趋势.

方差分析结果如表 3 所示.由表可以看出不同水位调控和灌溉水源对土壤中 0~20 cm 土层 Cd 质量比变化影响在 0.01 水平下具有统计学意义,对 20~40 cm 土层 Cd 质量比变化影响在 0.05 水平下

具有统计学意义;灌溉水源对土壤 20~40 cm 土层 Cr 质量比变化影响在 0.01 水平下具有统计学意义,对 40~60 cm 土层 Cu 质量比影响在 0.01 水平下具有统计学意义.

表 3 土壤重金属质量比变化双因素方差分析
Tab. 3 Two factor variance analysis of heavy metals content in soil

h/cm	w(Cd)		w(Pb)		w(Cr)		w(Cu)		w(Zn)	
	W	R	W	R	W	R	W	R	W	R
[0,20)	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
[20,40)	*	*	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS
[40,60)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS
[60,80]	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

注:W 代表水位调控,R 代表灌溉水源;** 表示 $P<0.01$,* 表示 $P<0.05$,NS 表示差异不具有统计学意义

2.2 水稻植株重金属质量比变化

不同灌溉水源和水位调控下植株器官重金属质量比累积变化如图 3 所示.对水稻茎部而言,除了 Pb,Zn,Cd,Cr 质量比随着灌溉水源从劣到优而降低,重金属总质量比按灌溉水源排序从大到小依次为 R1,R2,R4(2020 年);R1,R2,R3≈R4(2021 年),说明 R3,R4 水源灌溉水稻茎部重金属总量接近.不同水位调控重金属总质量比按水位调控排序从大到小依次为 W1≈W2,W3(2020 年);W1≈W2≈W3(2021 年),田间控制水位对茎部重金属质量比影响较小.对水稻叶部而言,Zn,Pb,Cd,Cr 质量比随着灌溉水源从劣到优而降低,重金属总质量比按灌溉水源排序从大到小依次为 R1,R2,R4(2020 年);R1,R4,R2≈R3(2021 年),相比茎部,灌溉水源对叶部重金属质量比影响减弱.不同水位调控下重金属总质量比按水位调控排序从大到小依次为 W1,W3≈W2(2020 年);W3,W1,W2(2021 年).对水稻籽粒而言,不同灌溉水源下重金属总质量比按灌溉水源排序从大到小依次为 R2≈R1,R4(2020 年);R1,R2,R3≈R4(2021 年).不同水位调控下重金属总质量比按水位调控排序从大到小依次为 W3≈W1≈W2(2021 年);W3,W2≈W1(2021 年),再生水灌溉处理下籽粒重金属质量比并未明显增加,符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762—2017)》中对稻谷中污染物的限量要求(Cd,Cr,Cu 限量分别为 0.2 ,1.0 ,0.2 mg/kg).水稻各部分重金属质量比从大到小依次为茎,籽粒≈叶,重金属组成从大到小依次为 Zn,Cr,Pb,Cd,灌溉水源对水稻茎、叶、籽粒中重金属质量比影响逐渐减弱.方差分析结果见表 4.

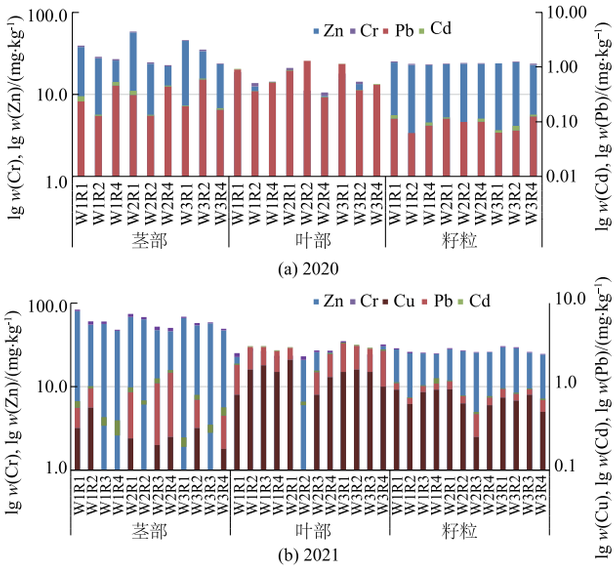


图 3 不同灌溉水源和不同水位调控下植株器官重金属质量比变化
Fig.3 Changes of heavy metal content in plant organs under different irrigation water sources and different water level regulations

表 4 植株器官重金属质量比变化双因素方差分析
Tab.4 Double factor variance analysis of heavy metal content in plant organs

年份	器官	w(Zn)		w(Pb)		w(Cd)		w(Cr)		w(Cu)	
		W	R	W	R	W	R	W	R	W	R
2020	茎	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	—	—
	叶	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	**	—	—
	穗	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	—	—
2021	茎	NS	NS	NS	**	**	NS	NS	NS	NS	NS
	叶	NS	NS	NS	NS	**	NS	*	NS	NS	**
	穗	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	**

注:** 表示 $P<0.01$,* 表示 $P<0.05$,NS 表示差异不具有统计学意义

可以看出灌溉水源对 2020 年茎、叶中 Zn 质量比影响在 0.05 水平下具有统计学意义,对 2020 年叶中 Cr 质量比、2021 年茎中 Pb 质量比和叶、籽粒中 Cu 质量比变化影响在0.01水平下具有统计学意义,对籽粒中 Pb 质量比变化影响在 0.05 水平下具有统计学意义;水位调控对 2021 年茎、叶中 Cd 质量比变化影响在 0.01 水平下具有统计学意义,对 2020 年、2021 年叶中 Cr 质量比变化影响在 0.05 水平下具有统计学意义.

2.3 土壤重金属质量比与土壤环境质量关系

不同水源条件下土壤中重金属质量比与土壤质量环境因子的相关性见表 5.R1 灌溉水源下,Cd 与 pH 呈极显著负相关,与 *EC*,NH_4^+-N 呈显著性负相关,与 OM,NO_3^--N 呈显著性正相关;Pb 与 OM 呈极显著性正相关,与 pH,*EC* 呈显著性负相关;Cr 与

NO_3^--N 呈极显著负相关,与 pH 呈显著性正相关;Cu 和 Zn 与 NH_4^+-N 呈显著性正相关.R2 灌溉水源下,Cd 与 NO_3^--N 呈显著正相关,与 *EC* 和 OM 呈显著性负相关;Pb 与 pH 呈极显著性负相关,与 *EC*,OM,NH_4^+-N 呈显著性正相关;Cr 与 NO_3^--N 呈显著负相关;Cu 与 NH_4^+-N 呈极显著性正相关,与 *EC* 和 OM 呈显著性正相关,与 pH 呈显著负相关;Zn 与 OM 呈显著性正相关,与 pH 呈显著负相关.R3 灌溉水源下,Cd 与 OM 呈极显著正相关,与 *EC* 呈极显著性负相关;Pb 与 pH 呈极显著正相关,与 OM,NO_3^--N 呈显著性负相关;Cr 与 pH 呈显著负相关,与 *EC*,OM 呈显著正相关;Cu 与 pH,OM 呈极显著性负相关,与 NH_4^+-N 呈显著性正相关;Zn 与 pH 呈极显著负相关,与 OM 呈显著性正相关.R4 灌溉水源下,Cd 与 pH 呈极显著负相关,与 *EC* 和 NO_3^--N 呈极显著正相关,与 NH_4^+-N 呈显著正相关;Pb 与电导率、NH_4^+-N,NO_3^--N 呈显著性正相关,与 OM 呈显著性负相关;Cr 与 *EC* 呈极显著正相关,与 OM,NO_3^--N,NH_4^+-N 呈显著正相关;Zn 与 pH 呈极显著负相关,与 NH_4^+-N 极显著正相关,与 OM,NO_3^--N 呈显著性正相关.以上分析表明,不同灌溉水源条件下,Cd 与 *EC* 呈显著相关,Pb 与 OM 呈显著相关,Cu 与 NH_4^+-N 均显著相关,Cr 与 Zn 不存在共同显著相关因子.

表 5　不同水源条件下土壤重金属质量比与土壤环境质量相关分析

Tab.5　Correlation analysis between soil heavy metal content and soil environmental quality under different water sources

水源	重金属	pH	*EC*	OM	NH_4^+-N	NO_3^--N
R1	Cd	−0.851 **	−0.430 *	0.642 *	−0.534 *	0.353 *
	Pb	−0.589 *	−0.618 *	0.854 **	−0.215	−0.004
	Cr	0.397 *	−0.095	−0.055	0.198	−0.739 **
	Cu	−0.171	−0.123	0.161	0.425 *	0.046
	Zn	0.238	−0.163	−0.159	0.427 *	0.053
R2	Cd	0.166	−0.389 *	−0.414 *	0.201	0.370 *
	Pb	−0.737 **	0.535 *	0.593 *	0.309 *	0.268
	Cr	0.206	−0.018	−0.244	0.279	−0.325 *
	Cu	−0.667 *	0.693 *	0.693 *	0.839 **	−0.132
	Zn	−0.442 *	0.168	0.363 *	−0.031	−0.184
R3	Cd	−0.242	−0.731 **	0.713 **	−0.286	−0.262
	Pb	0.747 **	0.002	−0.565 *	0.025	−0.378 *
	Cr	−0.634 *	0.338 *	0.364 *	0.264	0.036
	Cu	−0.762 **	0.104	0.738 **	0.514 *	0.087
	Zn	−0.745 **	0.221	0.540 *	0.235	−0.118
R4	Cd	−0.741 **	0.965 **	0.089	0.469 *	0.864 **
	Pb	−0.163	0.613 *	−0.649 *	0.330 *	0.500 *
	Cr	−0.236	0.781 **	−0.457 *	0.152	0.590 *
	Cu	−0.789 **	0.524 *	0.331 *	0.673 *	0.881 **
	Zn	−0.829 **	0.735 **	0.405 *	0.782 **	0.673 *

2.4　稻田重金属生态风险分析

采用潜在生态风险指数评价法对研究区域内不同水源灌溉农田土壤进行重金属潜在生态风险分析.计算公式为

$$RI = \sum E_i = \sum (T_i \cdot P_i), \qquad (1)$$

式中:*RI* 为土壤多种重金属综合潜在生态风险指数;E_i 为单因子生态风险系数;P_i 为单因子污染指数,为单污染因子的实测值与相应背景值之比;T_i 为土壤各重金属的毒性系数.

不同水源灌溉下稻田各土层重金属综合潜在风险指数见表 6.可以看出,稻田土壤 Cd 的生态风险系数最高,Cu 和 Pb 次之,Cr 和 Zn 风险系数较低.

表 6　不同水源灌溉下稻田重金属潜在风险指数

Tab.6　Potential risk index of heavy metals in paddy fields under different irrigation water sources

水源	*h*/cm	Cd		Pb		Cr		Cu		Zn		*RI*
		P_i	E_i	P_i	E_i	P_i	E_i	P_i	E_i	P_i	E_i	
R1	[0,20)	3.8	116.0	1.3	6.5	1.2	2.4	0.9	4.4	0.7	0.7	130
	[20,40)	3.2	96.0	1.1	5.6	1.1	2.2	0.7	3.4	0.9	0.9	108
	[40,60)	3.9	117.0	1.0	5.0	1.1	2.2	0.9	4.3	0.7	0.7	129
	[60,80]	8.8	265.0	1.1	5.7	0.9	1.8	1.1	5.4	0.8	0.8	279
R2	[0,20)	3.1	93.8	1.5	7.5	1.2	2.4	1.0	4.8	1.0	1.0	110
	[20,40)	3.8	115.0	1.3	6.5	1.0	2.0	0.7	3.6	1.1	1.1	128
	[40,60)	1.9	56.5	1.2	5.8	1.0	2.0	0.7	3.3	0.7	0.7	68
	[60,80]	2.9	85.7	1.1	5.7	0.9	1.9	0.8	3.8	0.7	0.7	98
R3	[0,20)	1.8	52.5	1.1	5.6	1.1	2.2	0.9	4.2	0.8	0.8	65
	[20,40)	1.8	54.4	1.6	8.0	0.9	1.9	0.6	2.9	0.6	0.5	68
	[40,60)	1.9	55.4	1.1	5.6	0.9	1.8	0.6	3.2	0.7	0.7	67
	[60,80]	2.1	63.0	1.2	6.2	1.1	2.2	0.6	3.0	0.8	0.8	75
R4	[0,20)	1.9	57.3	1.1	5.3	1.1	2.2	0.7	3.6	0.9	0.9	69
	[20,40)	2.4	72.4	1.1	5.5	1.1	2.2	0.8	3.8	0.6	0.6	84
	[40,60)	2.1	62.0	0.9	4.5	1.0	2.0	0.6	3.1	0.6	0.6	72
	[60,80]	3.0	90.0	1.0	5.2	1.3	2.3	0.7	3.7	0.7	0.7	101

表 7 为风险评级标准,由表可知,再生水灌溉总体并未对土壤造成严重污染,除 R1 外,其余水源灌溉下土壤平均重金属综合潜在生态风险程度均为轻度,R1 水源灌溉下 60~80 cm 土层土壤风险指数最高,R2 灌溉下 20~40 cm 土层土壤风险指数最高.

表 7　重金属生态风险评级标准

Tab.7　Ecological risk rating standard for heavy metals

等级	单因子生态风险		总潜在生态风险	
	E_i	生态风险程度	*RI*	生态风险程度
Ⅰ	<40	轻度	<150	轻度
Ⅱ	[40,80)	中度	[150,300)	中度
Ⅲ	[80,160)	较强	[300,600)	较强
Ⅳ	[160,320)	很强	≥600	很强
Ⅴ	≥320	极强		

各水源灌溉下 Cd 生态风险最高,R1 水源灌溉为很强风险,R3 水源灌溉为中度风险,R2 和 R4 为较强风险.不同水源灌溉相比,R3 水源灌溉下土壤重金属污染潜在生态风险最低,对土壤和地下水污染风险最小,R4 其次,R1 风险最大.

3 结 论

文中研究了农村生活再生水灌溉调控下稻田土壤、作物器官重金属质量比变化规律,分析了再生水灌溉调控下稻田重金属生态风险,主要结论如下:

1) 农村生活污水再生灌溉稻田 Cd,Pb 质量比略有升高,Cr,Cu,Zn 质量比下降,不同水位和水源处理对土壤中 0~20 cm 土层 Cd 质量比影响在 0.01 水平下具有统计学意义,对 20~40 cm 土层 Cd 质量比影响在 0.05 水平下具有统计学意义,灌溉水源对土壤 20~40 cm 土层 Cr 质量比和 40~60 cm 土层 Cu 质量比影响在 0.01 水平下具有统计学意义.

2) 水稻各部分重金属质量比按植株器官排序从大到小依次为茎,籽粒≈叶,重金属组成从大到小依次为 Zn,Cr,Pb,Cd,灌溉水源对水稻茎、叶、稻米中重金属质量比影响逐渐减弱,相对灌溉水源,水位调控对水稻植株各部分重金属质量比累积影响较小.再生水灌溉处理下籽粒重金属质量比并未明显增加,符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762—2017)》中对稻谷中污染物的限量要求.

3) 不同灌溉水源条件下,稻田 Cd 质量比变化与稻田 *EC* 显著相关,Pb 质量比变化与 OM 显著相关,Cu 质量比变化与 NH_4^+-N 显著相关,Cr 与 Zn 不存在共同显著相关因子.

4) 农村生活污水再生灌溉稻田 Cd 生态风险系数最高,Cu 和 Pb 次之,Cr 和 Zn 风险系数较低.各水源灌溉相比,R3 灌溉下土壤重金属污染潜在生态风险最低,对土壤和地下水污染风险最小.总体上,再生水灌溉并未对土壤造成严重污染,但长期进行再生水灌溉是否会造成重金属污染风险持续增加有待研究.

参考文献(References)

[1] WANG Z, LI J S, LI Y F. Using reclaimed water for agricultural and landscape irrigation in China: a review [J]. Irrigation and drainage, 2017, 66: 672-686.

[2] CHOPYK J, NASKO D J, ALLARD S, et al. Comparative metagenomic analysis of microbial taxonomic and functional variations in untreated surface and reclaimed waters used in irrigation applications [J]. Water research, 2020, 169: 115250.1-115250.13.

[3] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1550-1560.
WANG Shiyu, WU Wenyong, LIU Fei, et al. Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas [J]. China environmental science, 2018, 38: 1550-1560. (in Chinese)

[4] 陈苏春,胡静博,肖梦华,等. 农村生活再生水灌溉调控对稻田养分的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(4): 411-418.
CHEN Suchun, HU Jingbo, XIAO Menghua, et al. Effects of irrigation regulation of rural domestic reclaimed water on soil nutrients in paddy field[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2022, 40(4): 411-418. (in Chinese)

[5] MARTINE-PEREZ S, BIENES R, GARCIA-DIZA A, et al. Salt accumulation in soils and plants under reclaimed water irrigation in urban parks of Madrid (Spain) [J]. Agricultural water management, 2019, 213: 468-476.

[6] POUSTIE A, YANG Y, VERBURG P, et al. Reclaimed wastewater as a viable water source for agricultural irrigation: a review of food crop growth inhibition and promotion in the context of environmental change [J]. Science of the total environment, 2020, 739(5): 139756.

[7] 韩洋, 齐学斌, 李平, 等. 再生水灌溉对作物及土壤安全性影响研究进展 [J]. 中国农学通报, 2018, 34(20): 96-100.
HAN Yang, QI Xuebin, LI Ping, et al. Effects of reclaimed water irrigation on crop and soil security: research progress [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2018, 34(20): 96-100. (in Chinese)

[8] CHRISTOU A, ELIADOU E, MICHAEL C, et al. Assessment of long-term wastewater irrigation impacts on the soil geochemical properties and the bioaccumulation of heavy metals to the agricultural products [J]. Environmental monitoring and assessment, 2014, 186(8): 4857-4870.

[9] 白珊,倪幸,杨瑗羽,等.不同原材料生物炭对土壤重金属 Cd、Zn 的钝化作用[J].江苏农业学报,2021,37(5):1199-1205.
BAI Shan, NI Xing, YANG Yuanyu, et al. Immobiliza-

tion of soil cadmium and zinc by different raw material derived biochars [J]. Jiangsu journal of agricultural sciences,2021,37(5):1199-1205.(in Chinese)

[10] 郭汝凤, 李冠军, 刘鑫铭,等. 武夷山市人工湿地再力花和花叶芦竹的重金属累积和迁移特点[J]. 植物资源与环境学报,2020,29(4):28-35.
GUO Rufeng,LI Guanjun,LIU Xinming,et al. Accumulation and migration characteristics of heavy metal in *Thalia dealbata* and *Arundo donax* var. *versicolor* in constructed wetland of Wuyishan City[J].Journal of plant resources and environment,2020,29(4):28-35. (in Chinese)

[11] UGULU I, KHAN Z I, SHEIK Z, et al. Effect of wastewater irrigation as an alternative irrigation resource on heavy metal accumulation in ginger (Zingiber officinale Rosc.) and human health risk from consumption [J]. Arabian journal of geosciences, 2021, 14(8): 702.

[12] CHEN W, LU S, CHI P, et al. Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation [J]. Environmental pollution, 2013, 178: 294-299.

[13] 栗岩峰, 李久生, 赵伟霞, 等. 再生水高效安全灌溉关键理论与技术研究进展 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 102-110.
LI Yanfeng, LI Jiusheng, ZHAO Weixia, et al. Review on irrigation technology applying sewage effluent - advances and prospects [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(6): 102-110. (in Chinese)

[14] LI L, HE J, GAN Z, et al. Occurrence and fate of antibiotics and heavy metals in sewage treatment plants and risk assessment of reclaimed water in Chengdu, China [J]. Chemosphere, 2021, 272(1/2/3): 129730.

[15] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农田土壤重金属垂直分布迁移特征及生态风险评价 [J]. 环境工程, 2021, 39(2): 166-172.
DOU Weiqiang, AN Yi, QIN Li, et al. Characteristics of vertical distribution and migration of heavy metals in farmland soils and ecological risk assessment [J]. Environmental engineering, 2021, 39(2): 166-172. (in Chinese)

[16] NJUGUNA S M, MAKOKHA V A, YAN X, et al. Health risk assessment by consumption of vegetables irrigated with reclaimed waste water: a case study in Thika (Kenya) [J]. Environmental management, 2019, 231: 576-581.

[17] 崔丙健, 高峰, 胡超, 等.不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响 [J]. 环境科学, 2019, 38(7): 5151-5163.
CUI Binjian, GAO Feng, HU Chao, et al. Effect of different reclaimed water irrigation methods on bacterial community diversity and pathogen abundance in the soil-pepper ecosystem [J]. Environmental science, 2019, 38(7): 5151-5163. (in Chinese)

(责任编辑　徐云峰)