



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202101015

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

李亚惠, 朱仕坤, 李傲, 等. 农户庭院型生态工艺原位处理源分离后的洗涤废水[J]. 环境工程学报, 2021, 15(6): 2108-2117.
LI Yahui, ZHU Shikun, LI Ao, et al. Farmer courtyard-type ecological process for onsite treatment of washing wastewater after source separation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(6): 2108-2117.

农户庭院型生态工艺原位处理源分离后的洗涤废水

李亚惠^{1,2,3}, 朱仕坤^{1,2,3}, 李傲^{1,2,3}, 吕明环^{1,2,3}, KINHOUN Jean Joël Roland^{1,2,3}, 钱婷婷^{1,2,3}, 范彬^{1,2,3,*}

1. 中国科学院生态环境研究中心, 住房和城乡建设部农村污水处理技术北方研究中心, 北京 100085
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

第一作者: 李亚惠(1988—), 女, 博士研究生。研究方向: 分散污水治理。E-mail: 510015793@qq.com

*通信作者: 范彬(1969—), 男, 博士, 教授。研究方向: 分散污水治理等。E-mail: fanbin@rcees.ac.cn

摘要 选择长江三角洲地区有一定代表性的乡村家庭, 开展了厌氧池-多级布水模块化人工湿地原位处理源分离后的废水的实例研究, 旨在掌握乡村家庭源分离后废水的水质特征, 并通过厌氧池-多级布水模块化人工湿地, 重点解决乡村家庭源分离后的废水原位净化达标排放问题。结果表明, 耗氧有机物(以 COD 计)、BOD₅、LAS (linear alkylbenzene sulfonates) 是洗涤废水、灰水中的主要污染物质; 季节变化、进水浓度对厌氧池-多级布水模块化人工湿地处理源分离后的废水中的耗氧有机物、LAS 影响不显著, 但季节变化对粪大肠菌群影响显著。总体上, 2 户农户的设施出水均符合《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005) 水作作物的相关规定。

关键词 洗涤废水; 源分离; 原位; 人工湿地; 乡村

农村厕所革命的目的是面向现代化需求构建乡村环境卫生与污染治理的体系。当前已知的实现乡村环境卫生与污染治理现代化的路径有 2 条^[1]。第 1 条路径为末端处理, 组成设施主要是水冲厕所、管网、末端处理设施等, 类似于城市系统。人类排泄物, 与洗涤废水一起由管网收集后经处理设施处理后排放, 其出水需要达到一定的水质标准^[2]。由于农村地区支付能力的制约, 上述设施的建设和运行仅在少数地区可以负担, 如上海、北京, 江苏等地。第 2 条路径为源头分离分类处理^[3-6], 目标是尽可能使人居活动中产生的物质流以闭合循环的方式运行, 以期减少人居活动中的物质消耗, 促进资源的回收与再利用, 其组成设施主要是资源化厕所和粪尿的运输处置装置等。常见资源化厕所类型包括三格化粪池厕所、双瓮漏斗式厕所以及更为现代的负压源分离厕所。其中, 三格化粪池厕所、双瓮漏斗式厕所等, 由于其价格显著低廉及可负担的建设成本, 根据农业部门统计数据, 是目前我国农村地区厕所革命的主要形式。上述厕所是典型的资源化厕所, 其产生的粪尿等, 大多经无害化、稳定化后作为肥料施用于农田。相对于水冲厕所, 上述厕

收稿日期: 2021-01-04; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208494); 国家重点研发计划(2020YFD1100105); 厦门市科学技术局科学技术重点项目(3502Z20191012)

所被更多村庄采用,这也是农村改厕的现实情况。以负压源分离厕所系统为例,一般将生活废物和废水分为排污废水(粪尿与高浓度餐厨废液)、洗涤废水和其他废物3大类,采用抽吸式管道收集系统收集粪尿、粉碎的厨余垃圾及高浓度餐厨废液,所收集的高浓度排污废水经过资源化处理后,就近就地用于农田施肥,我们称之为现代田园循环模式^[7]。尽管源分离之后,生活废水、废物中超过90%的氮、磷等通过资源化进行消纳利用,但洗涤废水往往不经处理而直接排放,对环境产生污染。因此,洗涤废水的排放处理问题仍然必须慎重对待,尤其是在满足卫生与环境双重需求的前提下节省排水的成本。相对于城市,乡村地区地广人稀、地形复杂且居住分散,源分离后的洗涤废水如果集中收集排放,管道铺设距离长、施工难度大且经济成本增加,多数乡村地区难以实行。因此,为了降低管道铺设成本、施工难度及充分利用乡村富余的土地资源,我们提出原位处理洗涤废水的相关技术。

厌氧池作为初级的生活废水处理设施,不仅可以使有机物发生水解、酸化等作用,提高废水的可生化性,有利于后续处理,而且经济实用。人工湿地作为一种成熟的低能耗、低成本、低投资的生态处理技术^[8],具有其他常规废水处理技术不具备的优势。由于乡村地区地形复杂,施工困难,而多级布水模块化人工湿地有利于灵活施工,同时可以优化湿地内部水力条件,有利于废水中污染物的去除。因此,将源分离后的废水通过厌氧池-多级布水模块化人工湿地就地或就近处理后排入周边土地,既可以减少输水的成本,又可以减少废水处理成本^[9-12],因而应成为优先采用的技术方案。目前,国内利用人工湿地处理乡村混合生活污水的研究报道较多^[13-15],但在原水条件下,即家庭产生的废水未经其他预处理,利用农户家庭中的短距离管道直接进入农户庭院型处理设施的情况下,通过厌氧池-多级布水模块化人工湿地原位处理乡村家庭源分离后的洗涤废水,以及季节变化、污染负荷对其运行效果影响的研究尚未见报道。

针对上述问题,本研究选择长江三角洲地区有一定代表性的乡村家庭开展厌氧池-多级布水模块化人工湿地原位处理洗涤废水和灰水的研究。于2019年4月—2020年5月对连续运行约13个月的厌氧池-多级布水模块化人工湿地进行了采样及理化指标分析测试,分析了乡村家庭源分离后的洗涤废水、灰水的水质特征;评价了厌氧池-多级布水模块化人工湿地原位处理源分离后废水的运行效果以及季节变化、污染负荷对其处理效果的影响,以期为该工艺在乡村进一步推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 工程概况

研究区位于江苏省如皋市东陈镇杭桥村,属于典型的北亚热带海洋季风性湿润气候,年平均气温为14.6℃,多年平均降水量1055.5 mm,潜水水位埋深一般为1.0~3.8 m。设计建造的洗涤废水组合生态处理系统属于杭桥村负压源分离-资源化卫生系统的一部分,位于农户家庭的房前屋后,利用自然高程差,建立重力流管网,接收农户源分离后的废水。

目标村庄住户大多被农田所包围,有自来水供应,常住人口2549人,居住较多的人,多为中老年人。其中,男性成年人大多在附近城镇工作,农忙时节承担少量农活,女性成年人大多经常居家,做一些零散工作。而本研究中的2户家庭户籍人口均为3人,2人为中年人(1人在附近城镇工作,1人在家工作),1人为青年人(2户家庭中的青年人均在城市工作,常年不在家),常住人口2人。2户家庭人口结构完全一样,这在目标村庄有一定代表性。2019年3月,连续30 d对2户家庭源分离后废水水量进行了实际监测,农户1和农户2的人均排水量分别为102 L·d⁻¹和115 L·d⁻¹。根据监测结果,2户家庭源分离后的废水设计水量为人均110 L·d⁻¹。洗涤废水水质受到多种因素(生活习惯、社会文化行为、消费水平、家庭供水情况等)的影响,可能会有一定的水质波动。因

此,为了考察本工艺适应污染负荷的能力,选择与农户1家庭人员结构及生活习惯等类似的农户2,同时进行研究,但农户2的废水比农户1多了厨房高浓废水。在现代田园循环模式中,不含厨房高浓废水及厕所废水的废水叫做洗涤废水,包含厨房高浓废水但不包含厕所废水的废水叫做灰水。

1.2 采样与检测方法

本工程建于2019年4月中旬,2户农户家庭的系统进水均从厌氧池第1格室进行水样采集,农户1进水为洗涤废水,农户2进水为灰水,其系统出水均从多级布水模块化人工湿地的最后1格采样室进行水样采集。每周采样1次,进行监测分析,取月平均值进行数据分析,2020年2月,因新冠肺炎未进行采样分析。

检测项目分别为COD、SCOD、BOD₅、LAS、TN、NH₄⁺-N、TP、粪大肠菌群、SS、DO,检测方法分别为COD、SCOD采用快速消解密闭法,BOD₅采用无汞压力法,LAS采用亚甲蓝分光光度法,TN采用碱性过硫酸钾消解分光光度法,NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法,TP采用钼酸盐分光光度法^[16],粪大肠菌群(fecal coliform, FC)采用纸片快速法(广东达元绿洲食品安全科技股份有限公司),SS采用重量法,DO采用哈希的HQ30d水质监测分析仪。

1.3 工艺流程与构筑物设计

农户1洗涤废水处理工程的工艺流程如图1所示。源分离后的洗涤废水首先通过重力管道进入厌氧池,厌氧池可有效拦截废水中悬浮物,降低下一处理单元的堵塞风险;厌氧池的出水依靠重力流进入多级布水模块化人工湿地,湿地由3个处理模块和1个采样室组成,通过管道进行衔接,每个处理模块前端为布水区,废水经布水区均匀布水,有效降低湿地死区容积,实现湿地系统的水力学优化,节约占地,提升废水处理效率,出水经过采样室后排入房前屋后土地。农户2的厨房高浓废水随洗涤废水一起进入厌氧池+多级布水模块化人工湿地系统,其余与农户1一致。

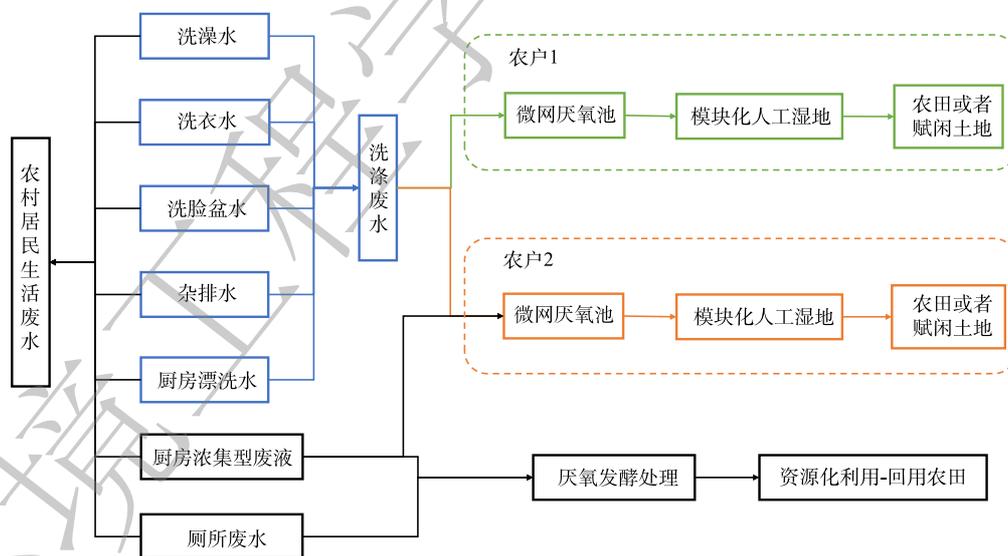


图1 组合生态工艺处理系统流程图

Fig. 1 Flow chart of combined ecological process treatment system

厌氧池的尺寸为900 mm×700 mm×800 mm(L×W×H),分为3个格室,各格室尺寸分别为300 mm×700 mm×800 mm(L×W×H)。废水在厌氧池的水力停留时间(HRT)约为2 d左右,厌氧池对废水中耗氧有机物(以COD计)、BOD₅、LAS、粪大肠菌群及SS的去除率大约分别在20%、15%、40%、70%及35%左右。源分离后的废水经农户庭院中短距离管道(8~12 m)收集后,首先进入厌氧池第1格室(初级腐化室),而废水在此停留时间低于1 d。因此,可认为厌氧池第1格室中的废水水质

与进水水质相差不大, 可以代表农户洗涤废水或灰水的水质。厌氧池第1格室内左侧设有进水管, 右侧为T字型过水孔; 第2格室(2级腐化室)结构与第1格室相同, 不同点为进水管下侧固定不锈钢滤网, 滤网目数20目; 第3格室(澄清室)进水管下侧固定不锈钢滤网, 滤网目数100目, 右侧为厌氧池出水管, 连接后续多级布水模块化人工湿地。图2(a)为厌氧池的结构示意图。

多级布水模块化水平潜流人工湿地的尺寸为225 cm×70 cm×80 cm(L×W×H), 模块化水平潜流湿地处理区填料高度为54 cm, 从下到上依次为陶粒、火山岩及无烟煤, 填料直径为5~15 mm, 孔隙率约为46%, 有效水深为50 cm, 上面覆盖26 cm土壤。废水在厌氧池的水力停留时间(HRT)约为1.5 d左右。湿地由3个处理模块(模块1、模块2、模块3)和1个采样室组成, 其中每个处理模块包含1个布水区, 模块3除了包含1个布水区外, 还有1个集水区, 布水区、集水区及采样室长度均为10 cm, 布水区与集水区填充粒径为20~30 mm的砾石, 采用穿孔管进行布水、集水。选用芦苇与4季常绿鸢尾为湿地植物, 植株密度30株·m⁻²。图2(b)为多级布水模块化人工湿地的结构示意图。

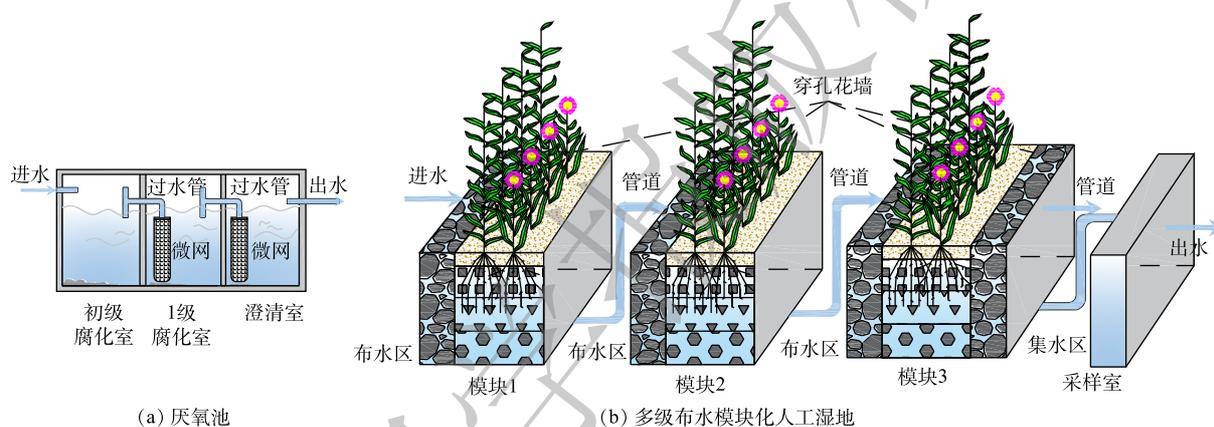


图2 构筑物结构图

Fig. 2 Structure diagram of facility

2 结果与分析

2.1 进出水中污染物浓度的变化

本研究对厌氧池-多级布水模块化人工湿地系统进出水中的污染物各指标浓度, 进行了1 a多的跟踪分析。由表1可知, 农户2进水(灰水)中各污染物的指标值均高于农户1进水(洗涤废水), 尤其是有机的浓度, COD、BOD₅、LAS、SS分别是农户1进水的2.0、1.5、4.0、1.6倍。这可能是因为农户2中含有厨房高浓废水, 而厨房废水中的有机物浓度较高。对厨房高浓废水中的TN、NH₄⁺-N和TP含量进行检测发现, TN、NH₄⁺-N和TP浓度分别为206~450、21~150和16~86 mg·L⁻¹。虽然厨房高浓废水中的TN、NH₄⁺-N和TP含量较高, 但其产生量仅为人均0.5~2.6 L·d⁻¹, 因此, 厨房高浓废水与洗涤废水混合后, TN、NH₄⁺-N和TP浓度仅略高于洗涤废水。农户1、农户2粪大肠菌群(FC)最大可能数均接近《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)水作作物标准限值。源分离后的洗涤废水总体上有机物浓度高, BOD₅/COD大于0.3, 并且COD/TN大于20:1, 属于高碳氮比废水。本研究中洗涤废水水质特征与文献报道的灰水相似^[17-19], 均呈现生化性良好, 氮、磷浓度低的特点。

农户1系统进水经过厌氧池后, 水体中耗氧有机污染物(以COD计)、BOD₅、LAS、SS和粪大肠菌群总数均出现一定程度的降低, 而TN、NH₄⁺-N、TP则出现升高的现象, 厌氧池对农户2系统中污染物的去除与农户1具有相似规律(表1)。厌氧池对废水中污染物去除能力有限, 这可能是由

表1 农户系统进出水中污染物各指标值

Table 1 Index values of pollutants of inlet and outlet of farmer system

农户	单元	SS/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	SCOD/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	LAS/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	FC最大可能 数/(个·L ⁻¹)
农户1	进水	34±16	108±43	113±40	216±83	5.3±3.0	10.6±6.4	8.1±5.0	0.8±0.6	5.6×10 ⁴ ±6.7×10 ⁴
	厌氧池	22±10	94±52	94±36	178±63	2.9±1.5	11.0±5.4	9.0±3.9	1.0±0.4	1.6×10 ⁴ ±1.8×10 ⁴
	湿地	8±6	32±20	33±17	62±53	1.9±1.0	6.8±3.1	5.6±3.1	0.5±0.2	4.4×10 ³ ±5.7×10 ³
农户2	进水	57±36	188±93	272±112	431±171	18.8±11.6	13.1±6.6	8.8±5.8	0.8±0.8	2.7×10 ⁵ ±6.1×10 ⁵
	厌氧池	36±15	141±79	250±118	318±152	12.6±7.1	16.0±8.8	11.2±5.7	1.2±0.8	3.6×10 ⁴ ±6.0×10 ⁴
	湿地	8±7	38±28	57±32	67±31	3.5±1.6	7.9±4.8	6.4±5.1	0.3±0.3	1.5×10 ⁴ ±4.4×10 ⁴

于在原水的条件下, 厌氧池主要依靠沉淀、过滤等作用, 拦截洗涤废水中颗粒性污染物, 并通过厌氧微生物的作用, 将颗粒性污染物进一步转化为溶解态污染物, 如有机酸、醇类等^[20], 然后再溶解于废水中。

农户1系统进水中的耗氧有机污染物(以COD计)、BOD₅、LAS、SS、粪大肠菌群总数、TN、NH₄⁺-N及TP经过模块化人工湿地后, 浓度均有明显降低(表1)。农户1模块化人工湿地出水中90%以上是溶解性耗氧有机物(以SCOD计)。这种情况可能是因为在湿地系统中, 不溶性耗氧有机物很容易通过填料的吸附、过滤和沉淀等作用从污水中去除, 但其又进一步在湿地中被水解转化为可溶性耗氧有机物(以SCOD计), 而可溶性耗氧有机物(以SCOD计)则主要通过湿地微生物的代谢活动分解为CH₄、CO₂和H₂S等小分子物质, 进而从系统中去除^[21-23]。作为洗涤废水中可溶性耗氧有机物(以SCOD计)的重要来源, LAS的去除率高于可溶性耗氧有机物(以SCOD计), 表明在湿地系统, LAS是一种相对容易去除的有机污染种类。相关研究显示, 微生物作用是表面活性剂在环境中降解的主要途径^[24]。在湿地出水中, 氮主要以NH₄⁺-N形式存在, 溶解氧不足是NH₄⁺-N不能转化为硝态氮的主要原因。根据经典氮去除途径, 硝化反应是脱氮的控制反应, 硝化反应正常进行需要保证湿地DO含量不低于1.0 mg·L⁻¹^[25], 而2个湿地系统中DO平均含量均低于1.0 mg·L⁻¹, 氧作为硝化反应过程中的电子受体, 溶解氧不足会降低硝化效率并限制NH₄⁺-N的转化^[22, 26]。由于NH₄⁺-N是人工湿地中氮的主要形式, 因此, 人工湿地对NH₄⁺-N的去除差异直接决定了其对TN的去除效果。多级布水模块化人工湿地对粪大肠菌群有一定的去除作用。有研究^[27]表明, 人工湿地系统对废水中病原微生物的指示指标—粪大肠菌群表现出良好的去除效果。模块化人工湿地对农户2灰水中的污染物的去除规律与农户1类似。

洗涤废水、灰水在设施中的总HRT均约为3.5 d时, 农户1系统出水中主要污染物耗氧有机物(以COD计)、BOD₅、LAS的年均值分别为62、32、1.9 mg·L⁻¹, 粪大肠菌群最大可能数为4.4×10³个·L⁻¹。运行稳定后, 农户1系统出水中的耗氧有机物(以COD计)、BOD₅、LAS浓度分别在50、30、3 mg·L⁻¹波动, 粪大肠菌群的最大可能数低于1.7×10⁴个·L⁻¹。受益于农户1系统进水中的氮、磷、SS处于较低值, 其出水中的TN、NH₄⁺-N、TP、SS年均浓度均分别低于10、8、0.5、8 mg·L⁻¹。由表1可知, 该工艺对农户2系统中污染物的总体去除性能与农户1具有相似规律, 2个农户系统的出水均满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)水作作物标准限值。

2.2 季节变化对污染物的去除影响

本实验自2019年4月开始进水, 由图3可知, 农户1系统在第1个春季出水中耗氧有机物(以COD计)和BOD₅浓度大约比第2个春季分别高100 mg·L⁻¹和60 mg·L⁻¹。这可能是因为第1个春季属于实验启动阶段, 而第2个春季属于运行稳定阶段。有机物的去除主要是系统中微生物的降解

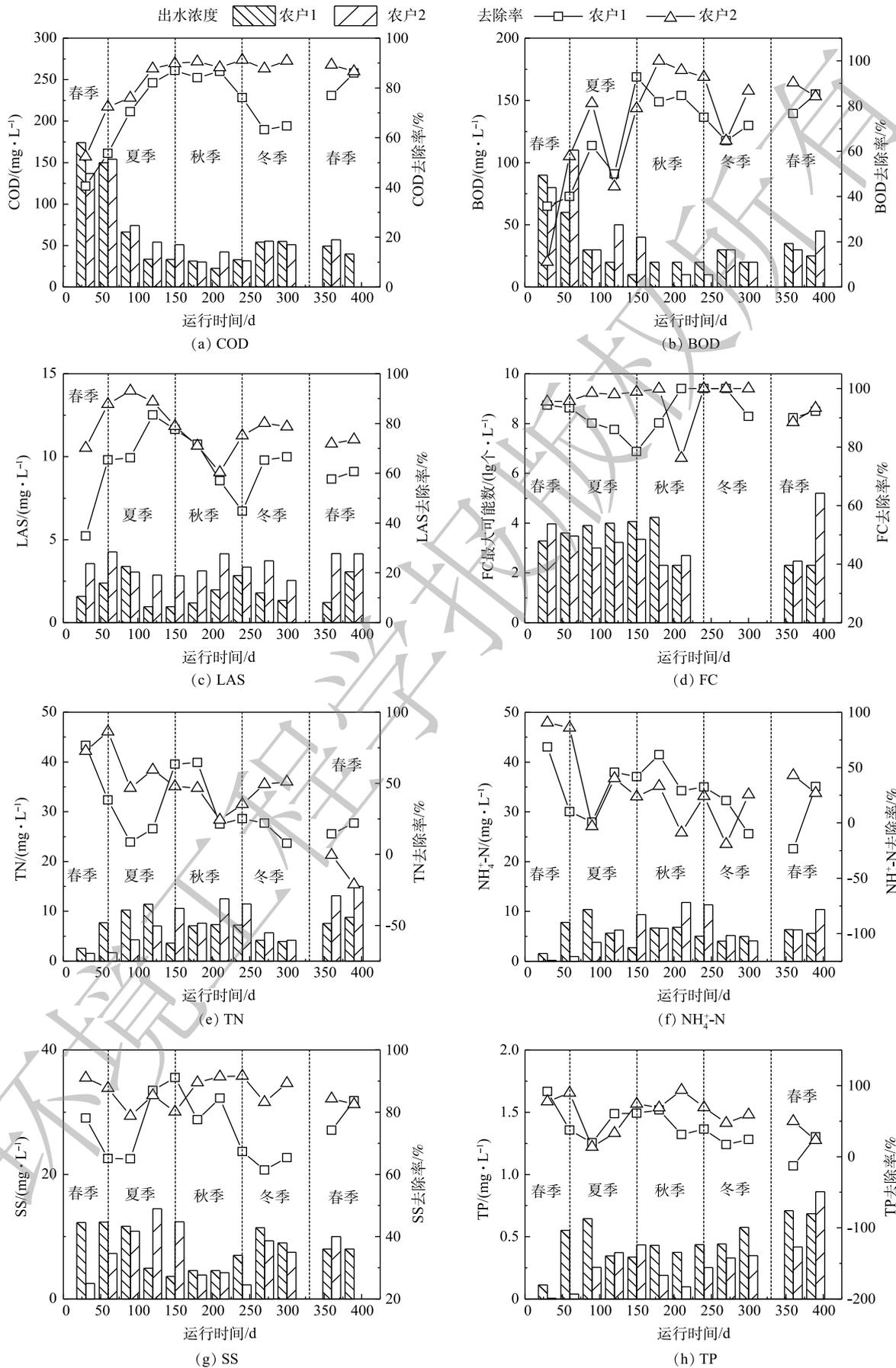


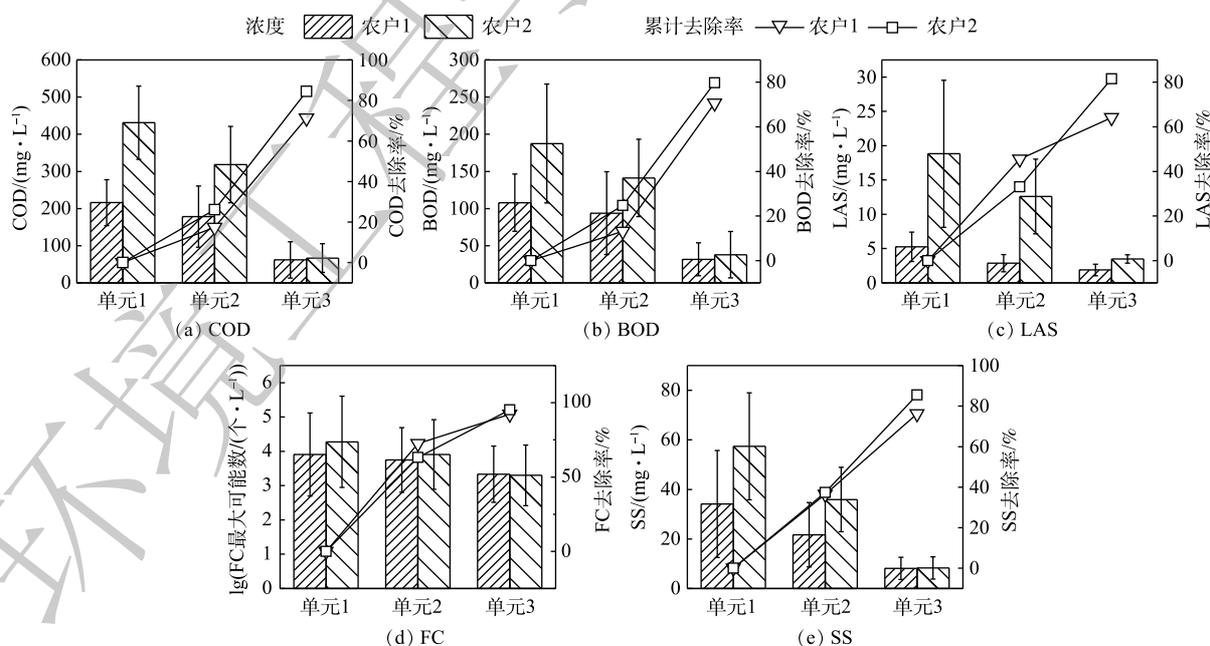
图 3 季节变化对 2 个农户系统出水中各污染物指标浓度及去除率的影响

Fig. 3 Influence of seasonal changes on the effluent concentration and the removal rates of each pollutant in two treating systems of rural households

作用。在启动阶段微生物活动能力弱,而经过将近1a的运行,湿地内的微生物比较丰富,微生物繁殖速度快,对污染物的消纳能力强,其适应有机物负荷的能力增强。在运行约60d后,2个农户系统出水中各污染物指标值均趋于稳定。从夏季到第2年春季,随着季节的变化,农户1系统出水中的耗氧有机物(以COD计)和 BOD_5 趋于稳定,分别为 $33\sim 54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\sim 35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而LAS低于 $3.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这表明该工艺对有机物的去除受季节变化影响较小。也有研究表明,人工湿地对耗氧有机物(以COD计)的去除特征随季节的变化不是很明显^[28-29]。农户1系统出水中SS维持在 $4\sim 12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SS的去除主要是通过系统的拦截、过滤及沉降作用,其去除机理为物理过程,故SS去除率基本不受季节变化的影响。农户1系统出水中的粪大肠菌群最大可能数随着季节变化显著,秋末、冬季和初春粪大肠菌群最大可能数均低于 $5.0\times 10^2\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,冬季系统出水中的粪大肠菌群最大可能数甚至为零,其他季节系统出水中粪大肠菌群最大可能数为 $1.0\times 10^3\sim 1.7\times 10^4\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$ 。农户1系统中的TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和TP的去除率在第2年春季比第1年春季明显降低,这可能是因为在第1年春季启动,启动阶段填料对废水中低浓度的TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和TP吸附性能较强;而随着运行时间的增加,在第2年春季,填料对TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和TP吸附能力降低,故其去除率下降。但洗涤废水、灰水中主要污染物为耗氧有机物(以COD计)、 BOD_5 、LAS,而原废水中TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和TP已经低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级B排放限值。因此,虽然系统中TN、氨氮和TP的去除率降低了,但其出水仍能满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)的标准限值。由图3可知,季节变化对该工艺处理农户2系统中的灰水、农户1系统中的洗涤废水具有相似的影响规律,但总体上农户2系统中耗氧有机物(以COD计)、 BOD_5 、LAS、FC及SS的去除率稍高于农户1。其可能原因是,农户2系统进水中的污染物各指标值均大于农户1,在这种进水情况下,污染物的去除率随着进水中污染物的增加而增加。

2.3 进水浓度对污染物去除的影响

由图4可知,农户2系统进水中年均 BOD_5 、COD、LAS值较农户1分别高出58、215、 $15.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,



注:单元1为厌氧池第1格室进水;单元2为厌氧池第3格室出水;单元3为湿地采样室出水。

图4 2个农户系统中各单元出水污染物年均指标值及累计去除率

Fig. 4 Annual average value and cumulative removal rate of pollutants in the effluent from each unit in two treating systems of rural households

表明农户1和农户2系统进水中的BOD₅、COD和LAS差异较大;而农户1和农户2系统出水中年平均BOD₅分别为32 mg·L⁻¹和38 mg·L⁻¹,年均COD分别为62 mg·L⁻¹和67 mg·L⁻¹,年均LAS均低于5 mg·L⁻¹,表明2个农户系统出水中BOD₅、COD和LAS值差异较小。这一研究结果表明,系统进水中有机物污染物浓度对BOD₅、耗氧有机物(以COD计)和LAS的去除影响不大,该系统能适应较大幅度有机负荷的波动。有研究^[30]表明,进水中耗氧有机物(以COD计)浓度对湿地中耗氧有机物(以COD计)的去除影响不显著。农户1和农户2系统进水中粪大肠菌群最大可能数分别为2.0×10²~2.4×10⁵个·L⁻¹和2.5×10²~2.4×10⁶个·L⁻¹,年均去除率均在90%以上。2户系统出水中粪大肠菌群最大可能数始终低于《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)水作作物标准限值,表明该系统具有一定细菌和粪大肠菌群污染去除的能力。由于农户1、农户2系统进水中TN、NH₄⁺-N和TP浓度均较低,2个农户系统进水中氮、磷浓度差异不明显。因此,使用厌氧池-多级布水模块化人工湿地处理洗涤废水时,可不考虑TN、NH₄⁺-N和TP负荷对其处理效果的影响。

2.4 成本与效益

1) 经济效益。每户家庭工程总投资为2100元,包括设施费用1500元、安装费用600元。根据工艺运行实际情况对设施进行清扫,在运行约13个月中,主要的运行维护工作是厌氧池的清扫(微网的清扫、浮渣的清掏)。农户1厌氧池微网的清洗、浮渣的清掏的清扫周期为2次·a⁻¹,而农户2为4次·a⁻¹;农户1和农户2厌氧池及模块化人工湿地的外壳、管道、填料等组件以及设施气密性、防渗性等功能的全面检查维修周期为1次·a⁻¹。由于该工艺为无动力运行,运行维护工作较简单,每户家庭每年运行维护费用仅为200元。

2) 环境效益。厌氧池-多级布水模块化人工湿地运行稳定后,对洗涤废水中主要污染物耗氧有机物(以COD计)、BOD₅、LAS、SS的削减量分别达到7.11~15.74、3.49~5.82、0.10~0.68、1.08~1.85 kg·a⁻¹。厌氧池和多级布水模块化人工湿地在处理农村单户家庭洗涤废水过程中,不仅解决了农村洗涤废水地表直排、蚊蝇滋生及视觉美感降低等问题,还可以有效控制系统出水中粪大肠菌群数,从而在满足环境卫生要求的同时,还可提升乡村居民居住环境的舒适度。

3 结论

1) 长江三角洲地区的乡村家庭源分离后的洗涤废水、灰水中主要污染物质是耗氧有机物(以COD计)、BOD₅、LAS, BOD₅/COD大于0.3、COD/TN大于20:1,2种废水总体均呈现有机物浓度高,生化性良好,氮、磷浓度低的特点,属于高碳氮比废水。

2) 洗涤废水、灰水在设施中总HRT约为3.5 d时,在运行稳定后,出水中的主要污染物耗氧有机物(以COD计)、BOD₅和LAS浓度分别在50、30和3 mg·L⁻¹左右,说明厌氧池-多级布水模块化人工湿地对其处理效果受季节变化和进水浓度影响不显著,出水达到《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)水作作物标准限值。

3) 在秋末、冬季及初春时,2个农户系统进水经过厌氧池-多级布水模块化人工湿地后,出水中的粪大肠菌群最大可能数为0~5.0×10²个·L⁻¹,而在其他季节则为1.0×10³~1.7×10⁴个·L⁻¹,受季节变化影响显著;2个农户系统进水中的粪大肠菌群最大可能数为2.0×10²~2.4×10⁶个·L⁻¹,而出水中粪大肠菌群浓度始终低于《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)水作作物标准限值,表明厌氧池-多级布水模块化人工湿地对粪大肠菌群污染具有较强适应能力。

参考文献

- [1] FAN B, HU M, WANG H, et al. Get in sanitation 2.0 by opportunity of rural China: Scheme, simulating application and life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 86-95.

- [2] FAN B, HU M, GU J, et al. Economic comparison of different rural sewage treatment patterns[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(14): 20-25.
- [3] WERNER C, PANESAR A, RÜD S B, et al. Ecological sanitation: Principles, technologies and project examples for sustainable wastewater and excreta management[J]. *Desalination*, 2009, 248(1/2/3): 392-401.
- [4] KATUKIZA A Y, RONTELTA M, NIWAGABA C B, et al. Sustainable sanitation technology options for urban slums[J]. *Biotechnology Advances*, 2012, 30(5): 964-78.
- [5] HAQ G, CAMBRIDGE H. Exploiting the co-benefits of ecological sanitation[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(4): 431-435.
- [6] LANGERGRABER G, MUELLEGGER E. Ecological sanitation: A way to solve global sanitation problems?[J]. *Environment International*, 2005, 31(3): 433-444.
- [7] XU M, ZHU S, ZHANG Y, et al. Spatial-temporal economic analysis of modern sustainable sanitation in rural China: Resource-oriented system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 340-347.
- [8] 陈咄圳, 郑向群, 华进城. 不同污染负荷对废砖垂直流人工湿地处理农村生活污水的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(8): 1683-1690.
- [9] BERNARDES F S, HERRERA P G, CHIQUITO G M, et al. Relationship between microbial community and environmental conditions in a constructed wetland system treating greywater[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 139: 105581.
- [10] LAAFFAT J, OUZZANI N, MANDI L. The evaluation of potential purification of a horizontal subsurface flow constructed wetland treating greywater in semi-arid environment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 95: 86-92.
- [11] NEMA A, YADAV K D, CHRISTIAN R A. Sustainability and performance analysis of constructed wetland for treatment of greywater in batch process[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2020, 22(6): 1-9.
- [12] DENG S, XIE B, KONG Q, et al. An oxic/anoxic-integrated and Fe/C micro-electrolysis-mediated vertical constructed wetland for decentralized low-carbon greywater treatment[J]. *Bioresour Technol*, 2020, 315: 123802.
- [13] 刘彤彤. 碳源分离耦合强化生态处理技术净化农村生活污水效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [14] WANG X, JIANG Z, FU A. Treatment of rural domestic sewage by combined technology of upflow anaerobic sludge blanket and two-stage constructed wetlands[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(11): 21-26.
- [15] 夏斌, 盛晓琳, 许枫, 等. A²O与人工湿地组合工艺处理长三角平原地区农村生活污水的效果[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(1): 181-192.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] LI F, WICHMANN K, OTTERPOHL R. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(11): 3439-3449.
- [18] BOANO F, CARUSO A, COSTAMAGNA E, et al. A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134731.
- [19] NOUTSOPOULOS C, ANDREADAKIS A, KOURIS N, et al. Greywater characterization and loadings-physicochemical treatment to promote onsite reuse[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 216: 337-346.
- [20] 薛念涛, 潘涛, 纪玉琨, 等. 好氧、厌氧、兼氧污水处理技术的原理: 兼谈水解酸化工艺的研发[J]. *环境工程*, 2015, 33(S1): 43-48.
- [21] LI P, WANG Z, YUAN L, et al. Comparison of two different constructed wetland systems to treat swine wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(4): 1341-1345.
- [22] SAEED T, SUN G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands:

- Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 112: 429-448.
- [23] LI J, WEN Y, ZHOU Q, et al. Influence of vegetation and substrate on the removal and transformation of dissolved organic matter in horizontal subsurface-flow constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(11): 4990-4996.
- [24] ARUNBABU V, SRUTHY S, ANTONY I, et al. Sustainable greywater management with axonopus compressus (broadleaf carpet grass) planted in sub surface flow constructed wetlands[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2015, 7: 153-160.
- [25] 张自杰. 排水工程(下册)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [26] ZHU H, YAN B, XU Y, et al. Removal of nitrogen and COD in horizontal subsurface flow constructed wetlands under different influent C/N ratios[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 63: 58-63.
- [27] 孙群, 吴蕾, 夏文香, 等. 人工湿地中指示和病原微生物分布与衰减研究[J]. *安全与环境学报*, 2009, 9(5): 63-66.
- [28] 项学敏, 杨洪涛, 周集体, 等. 人工湿地对城市生活污水的深度净化效果研究: 冬季和夏季对比[J]. *环境科学*, 2009, 30(3): 713-719.
- [29] 廖新伟, 骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 113-117.
- [30] 崔芳. 进水浓度对人工湿地净化城市湖泊水体影响研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(3): 101-103.
- (责任编辑: 曲娜)

Farmer courtyard-type ecological process for onsite treatment of washing wastewater after source separation

LI Yahui^{1,2,3}, ZHU Shikun^{1,2,3}, LI Ao^{1,2,3}, LYU Minghuan^{1,2,3}, KINHOUN Jean Joël Roland^{1,2,3}, QIAN Tingting^{1,2,3}, FAN Bin^{1,2,3,*}

1. North Research Center for Rural Wastewater Treatment Technology, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

*Corresponding author, E-mail: fanbin@rcees.ac.cn

Abstract In this study, two representative rural households in the Yangtze River Delta were taken as test sites, then a case study of on-site treatment of wastewater after source separation by an anaerobic tank- modular constructed wetland with multi-level water distribution (AT-MCW) was conducted. The aims of this study were following: grasping the water quality characteristics of rural household wastewater after source separation, and solving the problem of up-to-standard discharge of wastewater after source separation from rural households through on-site treatment with AT-MCW. The results showed that oxygen-consuming organic matter (in COD), BOD₅ and LAS (linear alkylbenzene sulfonates) were the main pollutants in washing wastewater and grey water; Seasonal changes and influent concentration had no significant effects on the treatment of oxygen-consuming organic matter and LAS in the two types of wastewater by AT-MCW, but seasonal changes had significant effects on fecal coliform; In general, the effluents from the facilities of AT-MCW in two rural household could meet the standard limit of water crop types in the Standards for Irrigation Water Quality (GB 5084-2005).

Keywords washing wastewater; source separation; on-site; constructed wetland; village