



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202008129

中图分类号 X703

文献标识码 A

汪浩, 王俊能, 陈尧, 等. 我国农村化粪池污染物去除效果及影响因素分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(2): 727-736.

WANG Hao, WANG Junneng, CHEN Yao, et al. Pollutant-removal performance of rural septic tank and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(2): 727-736.

## 我国农村化粪池污染物去除效果及影响因素分析

汪浩, 王俊能, 陈尧, 郑文丽, 魏清伟, 陈思莉, 蔡楠\*, 李明斌, 林兴周

生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510530

第一作者: 汪浩(1987—), 男, 博士, 助理研究员。研究方向: 水污染控制。E-mail: wanghao@scies.org

\*通信作者: 蔡楠(1966—), 女, 硕士, 研究员。研究方向: 环境检测技术。E-mail: cainan@scies.org

**摘要** 探究农村化粪池污染物去除效果及主要影响因素对于理解我国农村化粪池粪污处理现状十分必要。本研究基于山西、陕西、浙江、湖南、广东和重庆 6 个选点区域 57 家农户化粪池的监测结果, 分析了农村化粪池处理污染物的现状和主要影响因素。结果表明, 区域化粪池对化学需氧量(COD)、5 日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、动植物油(AVO)的削减率范围分别为 21%~65%、29%~72%、-12%~-2%、4%~12%、7%~21%、34%~62%, 整体表现为广东>浙江>湖南>重庆>山西>陕西; 由于对居民用排水习惯、化粪池纳污来源的影响, 温度、湿度、降雨量与化粪池污染物浓度及其去除率有较好的相关性。该研究结果可为化粪池去污效能的改善以及相关政策的制定提供参考。

**关键词** 美丽乡村; 厕所革命; 农村化粪池; 生活黑水; 削减率

化粪池(septic tank)是目前我国农村居民厕所污水的主要处理手段, 是利用沉淀和生物厌氧发酵作用对粪、尿等高浓度生活污水过滤和预处理作用的初级装置<sup>[1]</sup>。化粪池中污染物浓度通常较高, 其污染负荷占全部生活污水的比重较高, 因此, 运行良好的化粪池有助于避免污染物在居住环境的扩散、杀灭蚊蝇虫卵、提供有机肥料, 改善出水水质, 减小农村水环境污染<sup>[2-3]</sup>。依据 2016 年第三次全国农业普查结果, 我国配备水冲厕的农户占全国总农户比约为 39.3%。其中, 我国东部、中部、西部和东北地区分别占比为 56.3%、33.3%、33.5%、4.3%。我国农村居民住宅比较分散, 一般生活污水(灰水)和冲厕污水(黑水)排入沟渠、坑塘占比较高<sup>[4-9]</sup>, 加之水流缓慢, 滞留周期较长, 极易导致水体富营养化, 严重影响农村水环境质量<sup>[10-11]</sup>。随着农村改厕的不断推进, 化粪池的构建和处理效果对于预防疾病传播、改善农村人居环境尤为关键<sup>[12]</sup>。

“三格式”化粪池由于其工艺简单、造价低廉, 去污效果理想, 在我国农村较为常用。“三格式”化粪池通常由 3 个相关连通的密封格室组成, 生活黑水经第一格截留粪便残渣和初步生物发酵降解, 再经第二格对污染物持续厌氧发酵, 最后在第 3 格贮存和溢排<sup>[13]</sup>。另外, 生物厌氧发酵、气温变化、纳污强度、纳污类型、生活习惯等因素通过影响生物厌氧发酵过程、污水停留时间、污染物浓度, 最终决定化粪池对污染物的去除效果<sup>[14]</sup>。本研究通过监测山西、陕西、浙江、湖南、广东和重庆 6 个地区的典型农村居民家庭化粪池的进、出水水质, 对比各地化粪池对主要污染

收稿日期: 2020-08-14; 录用日期: 2020-12-11

基金项目: 第二次全国污染源普查项目(14402800000175027)

指标的处理效果,分析了潜在影响因素,为深入了解我国农村家庭化粪池使用现状和改进农村生活污水污染物处理技术提供参考。

## 1 实验方法

### 1.1 布点与监测

本研究针对各选点地区农村家庭的人口组成、主要污水类型、排放方式,在陕西、山西、浙江、湖南、广东、重庆6个地区分别选取90、90、34、30、93、90户进行问卷调查,并实地考察化粪池规格是否满足监测要求。经对各地气温、降水量、水资源分布、居民生活习惯等因素的统筹考虑,选取典型农村家庭作为进一步化粪池污水的监测对象。本次调查的化粪池为长方体,池深为1.2~1.5 m;池体设计容量因居住人口数有所差异,为1.5~3.0 m<sup>3</sup>。依据各农户客观情况,对其化粪池监测2~4期,每期3 d。监测时间为2018年8—9月、10—11月和2019年的4—5月、6—7月。依据各地区选点农户家庭具体情况,个别化粪池的监测频次或天数有所变动(表1)。

表1 典型农户化粪池分布与监测信息

Table 1 Information for distribution and monitoring of rural septic tanks

省市	采样点分布位置	数量/户	样本量/个	气温 <sup>1)/°C</sup>	降水 <sup>2)/mm</sup>	湿度 <sup>3)/%</sup>	收入 <sup>4)/万元</sup>
山西省	太原、忻州、阳泉	5	30	10.1	449.4	57.0	1.17
陕西省	汉中、西安、延安	8	26	13.8	587.2	63.7	1.12
浙江省	湖州	14	103	17.6	1496.8	74.0	2.73
湖南省	长沙、湘潭	12	69	17.9	1345.6	78.0	1.41
广东省	广州、河源、茂名	6	27	22.7	1843.1	80.7	1.72
重庆市	万州、长寿、奉节	12	70	18.3	1128.2	78.2	1.38

注: 1), 2), 3), 4)分别指选点区域的年均温度、年均降雨量、年均湿度、各省市农村居民人均可支配收入,数据来自2019年各省市统计年鉴。

本研究监测内容包括记录化粪池的纳污来源、冲厕水量等信息。采样点位设在农户冲厕污水排口与化粪池连接处和化粪池出水口处,采集时间每日07:00—09:00、11:00—13:00、15:00—19:00,将3次采集的化粪池进、出口污水分别混合均匀,经双层纱布(16~18目)粗过滤,去除其中较大颗粒物,添加稳定剂后,送实验室检测分析。

### 1.2 检测指标与方法

本研究检测的6项指标为化学需氧量(COD)、5日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总氮(TN)、总磷(TP)和动植物油(AVO),对应检测方法分别为重铬酸钾法(HJ 828-2017)<sup>[15]</sup>、稀释接种法(HJ 505-2009)<sup>[16]</sup>、纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)<sup>[17]</sup>、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)<sup>[18]</sup>、钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989)<sup>[19]</sup>、红外分光光度法(HJ 637-2012)<sup>[20]</sup>。

### 1.3 数据处理与分析

由于现场监测、样品采集、实验室分析过程中存在的不确定因素对检测结果的影响,导致个别检测数据偏离实际情况。在测算各污染指标特征值时,本研究依据数理统计方法甄别和剔除异常值(GB/T 4882-2001)<sup>[21]</sup>;指标间逻辑关系(例如,生活污水的COD/BOD<sub>5</sub>为1/3~2/3, NH<sub>3</sub>-N小于TN);采样现场状况,农户生活习惯,样品采集、运输、实验室检测环节是否失误3方面甄别和判定异常值。实验数据采用SPSS statistics25软件进行处理分析。

综合污染指标法是一种通过分析污染指标*i*对水体污染的贡献权重量化其风险程度的评价方法<sup>[22]</sup>,按式(1)和式(2)计算。本研究采用该法对各片区化粪池进、出水的污染程度进行比对比分

析，为量化不同来源水体的潜在污染指数提供依据。

$$P_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$P_i = \frac{C_i}{C_s} \quad (2)$$

式中： $P_c$  为水体综合污染指数； $P_i$  为污染物  $i$  的水质污染指数； $n$  为参与评价的污染物数量； $C_i$  为污染物  $i$  的特征浓度值； $C_s$  为污染物  $i$  的最大允许浓度阈值， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；由于目前农村生活污水处理设施水污染物排放标准尚无国家标准，因此本研究中各污染指标的  $C_s$  参照城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB 18918-2002) 中的一级 A 排放标准<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 检测结果

各选点农户化粪池污染指标统计结果表明，受多种因素的共同影响，各选点化粪池的进、出口污染指标浓度波动较大，且区域间存在一定差异 (表 2)。现场调查表明，与城镇生活污水通常纳入管网统一处理相比，农村住戶居住分散，生活污水直排入环境水体更为普遍，导致农村水体富营养化加剧。本研究参考综合污染指数的计算公式，以 6 项污染指标计算得到各选点地区化粪池污染指数  $P_c$ ，结果显示，陕西省和重庆市的化粪池污染指数最高，其次为湖南省和山西省，最后为广东省和浙江省，整体呈现为内陆到沿海省份逐渐递减的趋势。这一趋势与我国各区域气温、降水分布特征<sup>[24]</sup> 较为相似，说明了气候要素可能是影响化粪池污染特征和去污能力的重要因素。

表 2 农村居民家庭化粪池污染指标检测结果  
Table 2 Determination results of pollution indicators for septic tanks in rural households  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

省市	类型 <sup>1)</sup>	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	AVO	$P_c$
		平均值±标准差	平均值±标准差	平均值±标准差	平均值±标准差	平均值±标准差	平均值±标准差	
山西省	进口	1903.1±741.3	969.3±260.4	282.2±135.4	351.9±161.8	35.5±21.8	8.7±4.6	43.18
	出口	1483.8±605.1	657.8±245.7	296.5±241.2	325.9±182.4	32.6±15.3	5.7±2.6	35.80
陕西省	进口	1919.8±587.8	882.7±347.3	317.1±265.1	446.3±306.5	26.9±11.9	4.82±4.0	41.93
	出口	1512.0±559.6	629.2±330.1	322.7±207.9	411.1±211.9	23.2±5.9	2.79±2.1	35.19
浙江省	进口	1442.5±493.5	634.3±265.9	150.6±46.7	256.1±70.9	14.4±4.5	8.0±5.6	26.98
	出口	609.1±217.6	255.7±107.0	160.4±54.3	225.4±60.6	13.52±3.6	3.8±2.6	17.02
湖南省	进口	1351.9±632.3	472.6±217.5	192.3±91.7	381.7±140.4	32.9±16.0	14.0±9.1	30.85
	出口	628.6±293.6	215.2±96.7	210.2±100.6	365.5±168.1	26.18±10.6	6.9±3.7	22.26
广东省	进口	1409.1±710.5	507.9±256.9	179.1±97.9	216.0±110.2	20.3±8.7	8.2±6.9	26.28
	出口	494.3±224.9	140.1±83.6	199.7±85.2	194.8±87.2	16.98±7.3	3.1±2.6	16.14
重庆市	进口	1602.3±519.9	587.9±290.1	226.2±154.8	307.8±180.0	37.8±14.9	14.9±4.9	34.88
	出口	836.7±438.3	313.6±172.7	241.1±147.7	281.6±162.9	30.7±14.3	8.0±5.1	25.51

注：1)指分别用进、出表示化粪池进出、口端污水类型。

### 2.2 指标对比分析

1) COD 与 BOD<sub>5</sub>。本研究测得化粪池进口的 COD 和 BOD<sub>5</sub> 浓度分别为 1300~2000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 400~900  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，与相关学者的研究结果<sup>[13, 25-26]</sup> 基本一致。各选点化粪池进口的 COD 和 BOD<sub>5</sub> 浓度差异在一定程度上反映了农户产生黑水的强度和洗澡、洗涤等生活习惯的不同<sup>[27-28]</sup>。各选点化粪池

进口 COD 浓度差异大体呈现陕西>山西>重庆>浙江>广东>湖南的特征(图 1(a))。结合入户调查情况,发现导致该特征的 2 点潜在原因。第一,湖南、广东、浙江等南方省份水资源丰富,选点地区农户均使用水冲式厕所;而且,部分农户日常的洗澡、洗涤污水也纳入化粪池,稀释了污水的进水浓度。第二,重庆、山西、陕西选点地区的部分农户生活污水混排入厕少见,导致化粪池含水量更低,本研究中,现场采集到的化粪池水样整体更为浑浊,测得污染物的特征浓度更高。

各选点化粪池对 COD 与 BOD<sub>5</sub> 的削减率如图 1(b) 所示,广东选点化粪池对 COD 和 BOD<sub>5</sub> 的削减率最高,分别为 65% 和 72%;浙江、湖南、重庆、山西次之;陕西的削减率最低,分别为 21% 和 29%,选点地区农村化粪池 COD 和 BOD<sub>5</sub> 削减率分别为 45±19% 和 49±17%。王玉华等<sup>[13]</sup>研究表明,江苏农村化粪池对 COD 的削减率为 48.5%,《村镇生活污染防治最佳可行技术指南(征求意见稿)》中关于村镇化粪池对黑水 COD 的削减率为 40%~50%,本研究中 6 片区的 COD 均值较上述结果较为接近,但广东、浙江对应 COD 削减率略高于这一阈值,陕西、山西农户化粪池低于上述研究结果。其可能的原因为,采样监测方式和区域气候差异所致。例如,本研究在化粪池进口样品采集过程中虽用纱布滤除较大悬浮颗粒物,但残留的细小颗粒物依然影响指标检测结果。丁慧等<sup>[29]</sup>研究表明,化粪池对颗粒态物质的滤过性是 COD 削减的主要来源;ZHANG 等<sup>[30]</sup>研究表明,对污染物的沉淀和过滤作用是影响化粪池去污效率的主要因素,其次为微生物的生化作用。此外,温度是影响微生物厌氧发酵的重要因素。较高的气温或者土壤温度有利于污染物的水解作用和化粪池对 COD 与 BOD<sub>5</sub> 的生物降解效率<sup>[30-31]</sup>。依据各地统计年鉴,山西、陕西、浙江、湖南、广东、重庆 2018 年年均气温分别为 (9.3±2.3)、(13.6±2.3)、(17.3±3.1)、(18.0±0.6)、(22.5±1.2)、(17.5±1.5) °C。地处我国南部的浙江、湖南、广东和重庆全年气温较山西和陕西高,这有利于化粪池菌群生长和对污染物生化降解<sup>[32-33]</sup>。

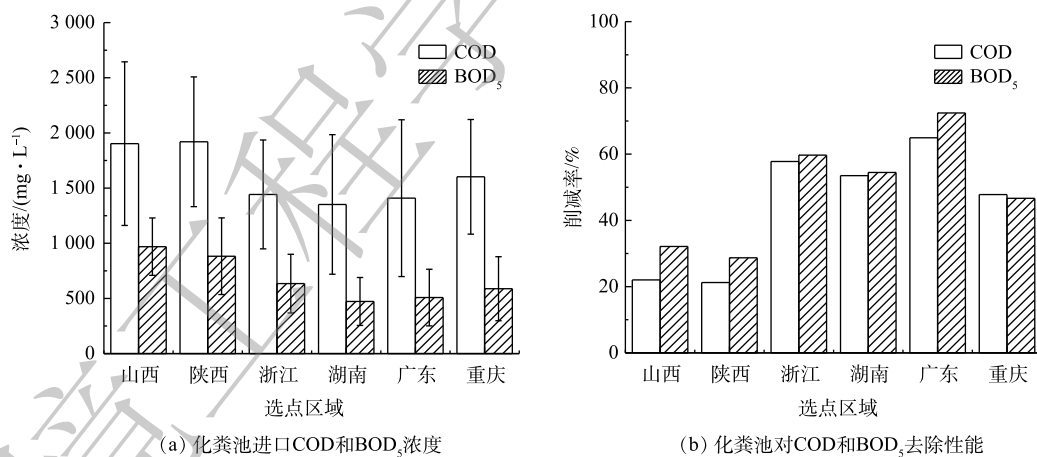


图 1 选点区域化粪池进口 COD 和 BOD<sub>5</sub> 浓度及其削减率

Fig. 1 Concentrations and removal rates of COD and BOD<sub>5</sub> of septic tanks in regions

2) NH<sub>3</sub>-N 和 TN。化粪池黑水是居民生活污水 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 的主要排放源。在本研究中,各选点化粪池的 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 浓度整体趋势为陕西>山西>湖南>重庆>浙江>广东(图 2(a))。各化粪池对 NH<sub>3</sub>-N 的削减率为负值,对 TN 的削减率整体较低,为 5%~12%(图 2(b)),这一结果与多数研究结果相符<sup>[13, 34-35]</sup>。本研究中入户调查表明,山西和陕西地区化粪池仅受纳冲厕废水,而浙江、湖南、广东、重庆地区农户通常将洗澡、洗漱等废水一并排入化粪池,稀释了 TN、NH<sub>3</sub>-N 浓度。这一差异可能是导致陕西和山西化粪池 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 浓度较其他省份高的主要原因。

另外,有研究表明,化粪池水力停留时间长有利于微生物对氮素的氨化作用<sup>[35-36]</sup>,而山西和



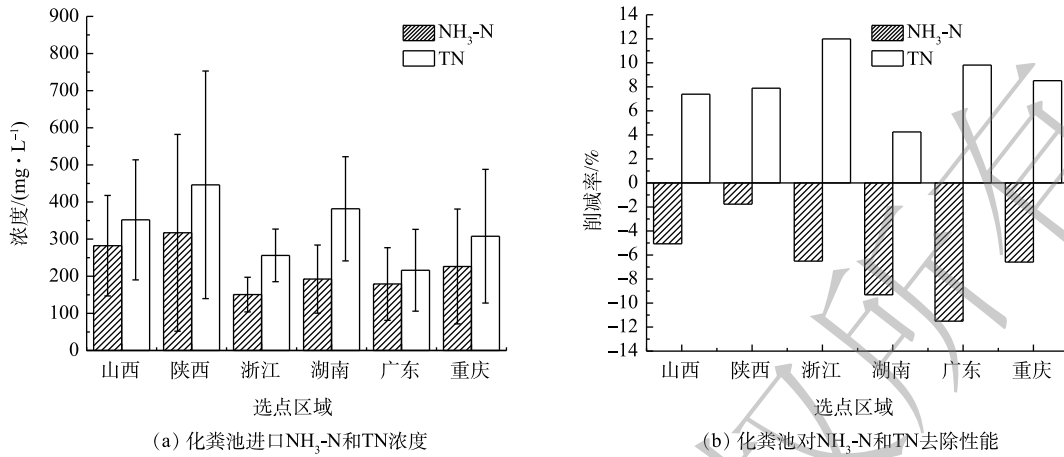


图 2 选点区域化粪池进口 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 浓度及其削减率

Fig. 2 Concentrations and removal rates of NH<sub>3</sub>-N and TN of septic tanks in regions

陕西污水浓度高、停留时间长、更新慢，因而一定程度上有利于微生物对氮素的氨化作用。本研究通过采集农村化粪池进、出口端污水，在实验室模拟了封闭条件下微生物对 NH<sub>3</sub>-N 的削减率的动力学过程，结果表明，在 384 h 内，化粪池进口水样中 NH<sub>3</sub>-N 浓度呈现波动式上升趋势，而出口水样的 NH<sub>3</sub>-N 浓度较为稳定。这一差异说明，含氮有机物的厌氧氨化作用是导致化粪池对 NH<sub>3</sub>-N 削减不佳的关键原因 (图 3)。

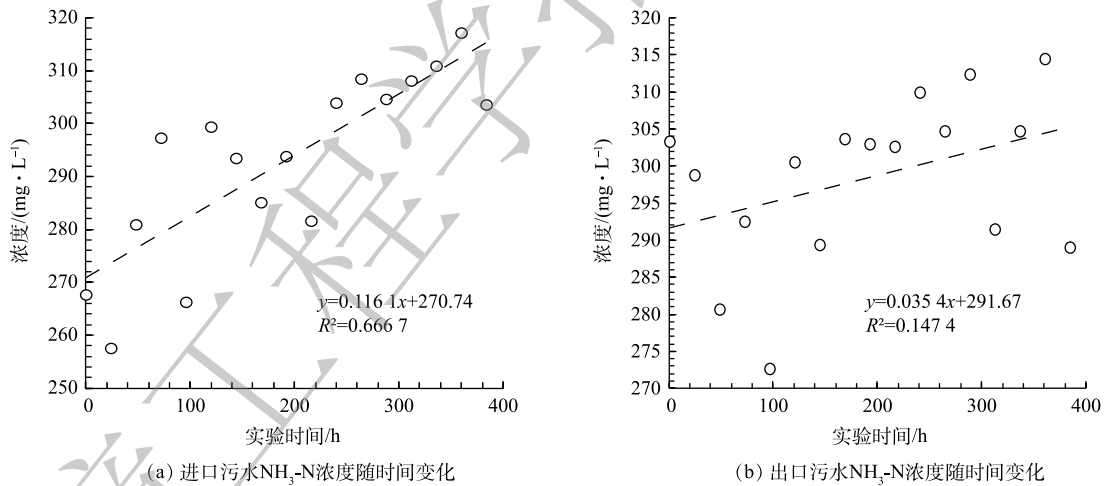


图 3 化粪池进、出口污水的 NH<sub>3</sub>-N 在无氧条件下的变化特征

Fig. 3 Dynamic characteristics of NH<sub>3</sub>-N concentrations of inlet- and outlet sewages of septic tanks at the anaerobic condition

3) TP 和 AVO。TP 和 AVO 浓度及其削减率见图 4。各选点化粪池进口污水 TP 和 AVO 浓度如图 4(a) 所示，相比广东和浙江，重庆和湖南、山西、陕西的 TP 浓度较高。王慧娜等<sup>[37]</sup>的研究表明，人均收入和食品价格指数的增加会降低人均摄入磷含量，可能影响化粪池污水中 TP 含量。在本研究中，山西、陕西、浙江、湖南、广东、重庆 2018 年农村人均可支配收入为 1.17 万元、1.12 万元、2.73 万元、1.41 万元、1.72 万元、1.38 万元 (表 1)，浙江和广东农村居民可支配收入较相似气候条件下的湖南、重庆高，而对应化粪池 TP 浓度较低，这一结果与王慧娜等<sup>[37]</sup>研究结果较为吻合。由于化粪池中 TP 浓度受收纳水体类型、局部温度、居民生活及饮食习惯、水体停留时间等多个因素影响，故关于上述结果仍需要进一步验证。

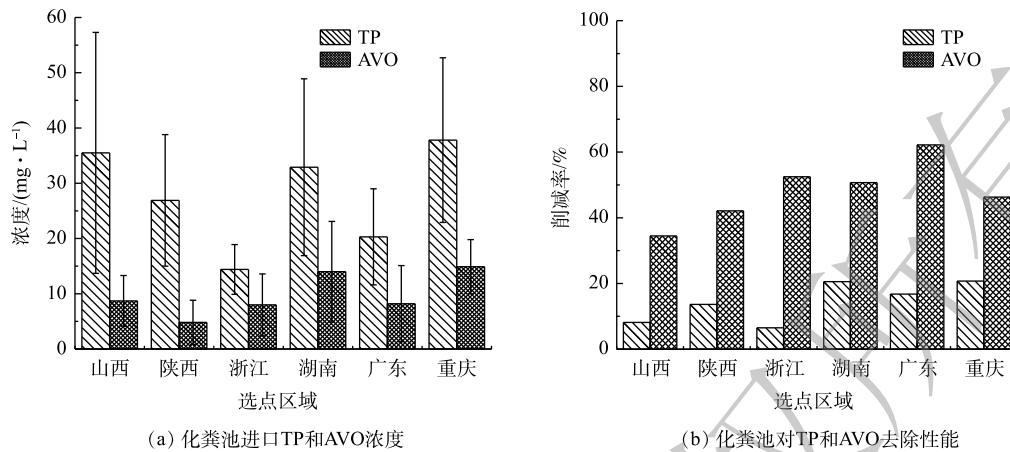


图4 选点区域化粪池进口TP和AVO浓度及其削减率

Fig. 4 Concentrations and removal rates of TP and AVO of septic tanks in regions

重庆、湖南选点化粪池较广东、浙江具有更高的AVO浓度，这可能归因于湖南和重庆饮食偏油偏辣，当地居民摄入AVO量较高。依据2018年《中国统计年鉴》统计结果，湖南、广东、浙江、重庆居民家庭年人均食用油消费量分别为12.4、9.2、12.1、14.8 kg<sup>[38]</sup>，这表明食用油摄入量对化粪池的AVO浓度有重要影响。山西选点化粪池AVO浓度略高于陕西，但山西居民家庭年人均食用油8.1 kg，低于陕西的10.9 kg。结合现场调查，本研究认为，除摄入量的影响，污水在化粪池停留时间、生物降解速率等因素也影响化粪池对动植物的削减率。各选点化粪池对TP的削减率整体较低，分布于7%~21%(图4(b))，各片区TP的削减率未表现出明显规律，可能受居民磷摄入量、化粪池混排特征等多因素影响<sup>[34, 37]</sup>。各选点化粪池对AVO的削减率为广东>浙江>湖南>重庆>陕西>山西，呈现南方选点区域大于北方、东部选点区域大于西部的特征。本研究认为，选点区域气候特征、污染物停留时间是影响化粪池削减AVO的重要因素。

### 2.3 相关性分析

本研究分析了各选点区域化粪池进、出口污染指标浓度以及对应削减率与年均气温、年均相对湿度、年均降水量之间的相关性(表3)。结果表明，化粪池COD和BOD<sub>5</sub>的进、出口浓度与各地区年均降水量的具有显著的负相关性，其次与气温、湿度也有显著的负相关性。降水量一定程度反映了各区域水资源可获得

表3 化粪池指标与影响因素相关性分析

Table 3 Correlation analysis of indexes of septic tanks and influencing factors

检测指标	数据类型	温度/°C	湿度/%	降水量/mm
气温/°C	全年平均	1		
相对湿度/%	全年平均	0.952**	1	
降水量/mm	全年平均	0.943**	0.902*	1
COD	进口	-0.830*	-0.894*	-0.927**
BOD <sub>5</sub>	进口	-0.901*	-0.977**	-0.895*
NH <sub>3</sub> -N	进口	-0.743	-0.780	-0.906*
TN	进口	-0.666	-0.568	-0.772
TP	进口	-0.422	-0.247	-0.565
AVO	进口	0.281	0.528	0.244
COD	出口	-0.892*	-0.926**	-0.968**
BOD <sub>5</sub>	出口	-0.928**	-0.956**	-0.971**
NH <sub>3</sub> -N	出口	-0.725	-0.763	-0.893*
TN	出口	-0.644	-0.536	-0.746
TP	出口	-0.592	-0.444	-0.696
AVO	出口	-0.080	0.186	-0.116
COD	削减率	0.911*	0.919**	0.983**
BOD <sub>5</sub>	削减率	0.901*	0.845*	0.988**
NH <sub>3</sub> -N	削减率	-0.819*	-0.789	-0.881*
TN	削减率	0.326	0.176	0.366
TP	削减率	0.517	0.623	0.286
AVO	削减率	0.956**	0.870*	0.973**

注：\*\*指在 $\alpha=0.01$ 下(双尾)，相关性显著；\*指在 $\alpha=0.05$ 下(双尾)，相关性显著。

性，即水资源易获得区域的农村居民化粪池 COD、BOD<sub>5</sub> 浓度较低。结合入户调查，观察到农村居民有将洗澡、洗漱、洗涤等废水一并排入化粪池的习惯，较高的气温、湿度、水资源易获得性导致洗澡、洗涤频次增加，稀释了化粪池污水浓度。另外，较高的温度、湿度、降水量与 COD、BOD<sub>5</sub> 的削减率正相关，这在一定程度上说明农户稳定的排水量、较高的温度有利于化粪池对 COD、BOD<sub>5</sub> 的去除<sup>[39-40]</sup>。根据本研究中的调查发现，山西、陕西选点农村居民化粪池主要收集冲厕污水；浙江、湖南、广东、重庆选点地区的化粪池除收纳冲厕污水，还收纳洗澡、洗漱等废水，这导致化粪池 NH<sub>3</sub>-N 浓度被稀释。另外，本研究中观察到，化粪池 NH<sub>3</sub>-N 去除率与温度间负相关，即温度越高，NH<sub>3</sub>-N 浓度越高，削减率越低。刘忠宽等<sup>[41]</sup> 研究发现，家畜排泄物氮的氨化作用与温度呈正相关，炎热、湿润的气候有利于氨化过程的进行。房景燕等<sup>[42]</sup> 在 UASB 工艺处理畜禽废水的研究中，也观察到温度与废水氮氨化率呈正相关关系。本研究各片区 NH<sub>3</sub>-N 的削减率表明，区域较高的气温对氨化过程的促进作用是导致化粪池去除 NH<sub>3</sub>-N 效率不佳的关键原因。TN 与 4 个影响因素之间均无显著相关，这可能是 TN 来源较为分散、受影响因素较多导致的。AVO 的削减率与气温、降雨量之间具有显著正相关，说明较高的气温、稳定的排水量有利于 AVO 的削减。

#### 2.4 讨论

化粪池主要通过沉淀\过滤作用去除大部分非溶解态污染物，再经过微生物发酵作用降解掉部分溶解态污染物，最终达到对污染指标的削减。LEW 等<sup>[14]</sup> 的研究表明，化粪池在同等条件下对生活污水中非溶解态 COD 去除效率是溶解态 COD 的 2 倍多；如果考虑各类 COD 占总 COD 的比重，前者的削减率是后者的 4~9 倍。黑水中非溶解态污染物含量高于生活灰水，因此，化粪池通过沉淀\过滤作用去除污染物的占比更高。三格式化粪池的沉淀\过滤作用主要发生在第 1 格，生物降解作用主要发生在第 2 格，故化粪池结构的合理性是保证其良好运转的关键。

化粪池对 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 的去除效果较差是多因素共同作用的结果。污水中的有机氮需要经过氨化、亚硝化、硝化和反硝化作用转化为气态氮，其中微生物氨化作用是导致化粪池 NH<sub>3</sub>-N 浓度增加的主要原因。化粪池因生化作用而缺氧，从而抑制了亚硝化、硝化作用和反硝化作用过程，导致化粪池对 TN 削减率较低<sup>[43]</sup>。为降低生活污水中 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 等污染物的排放浓度，目前选点区域有采用化粪池等无动力污水处理工艺与小型人工湿地联用、或采用中小型有动力污水处理工艺对农户的生活污水集中处理，可显著改善出水水质<sup>[44-46]</sup>。由于各类工艺在建设和运维成本、处理效果上受限于气候、居住人口、污水排量等因素的影响，需结合区域特征，因地制宜<sup>[14, 47]</sup>。

水力停留时间是影响化粪池去除粪污效率的重要因素，农村化粪池的理论停留时间为 60 d<sup>[48]</sup>，其中 3 个格子的停留时间比为 2:1:3。本研究中现场调查表明，山西、陕西农村居民化粪池主要收集冲厕污水；浙江、湖南、广东、重庆地区的化粪池则收纳冲厕污水、洗澡、洗漱污水，从而导致化粪池进水水量大于其理论设计容量，稀释了粪污浓度，缩短了水力停留时间。按照本研究现场监测的结果，山西、陕西、浙江、湖南、广东、重庆的洗漱和洗澡污水量分别是冲厕污水体积的 0.6、0.5、1.0、1.2、0.9、0.7 倍。浙江、湖南、广东、重庆地区粪污水力停留时间分别由 60 d 缩短为 29.3、27.0、31.8、34.8 d。韦昆<sup>[35]</sup> 模拟了水力停留时间对化粪池处理农村污水的影响，数据显示，生化 4 周后，化粪池对 COD、BOD、TN、TP 和 AVO 的去除率可分别达 70%、80%、5%、8%、80%；8 周后，各指标去除率可分别达 80%、90%、5%、8%、80%。这一结果显示，化粪池水力停留时间由 4 周增至 8 周，可导致 COD、BOD 的去除率略有增加，但对 TN、TP、AVO 的削减率影响较小。关华滨<sup>[49]</sup> 的研究表明，相同温度下，灰水在化粪池中停留 48、84 h 后，COD 的去除率分别为 71%、75%；屠宰场污水在化粪池停留 2.5、7.2、26.4 h 后，COD 去除率分别为 75%、80%、89%。上述结果表明，水力停留时间有助于污染物削减，但单一水力停留时间对污染物去除

率的影响依然有限,需要综合考虑污染物浓度、种类、温度等指标的综合影响。结合本文研究结果,浙江、湖南、广东、重庆水力停留时间缩短,但去除率高于山西和陕西,表明相比于水力停留时间,温度等因素对化粪池污染物去除率有较大影响。

温度对化粪池去污能力的影响主要体现在调控有机物的溶解速度和生化反应强度两方面。LEW等<sup>[14]</sup>的研究表明,当反应温度从10℃提高到28℃时,非溶解态污染物的溶解度提升2.2倍,溶解态污染物的生物降解速率提高了1.5倍,总COD的削减率提高了1.9倍。我国幅员辽阔,各省全年气温差异较大,大体呈现由南向北、自东向西的气温递减和年温差增大的趋势<sup>[50]</sup>。随着水冲厕在我国北方地区的普及,解决低温条件下化粪池的去污效能低的问题尤为关键<sup>[29]</sup>。

结合采样现场调查,本研究得出目前影响农村化粪池正常运转的因素包括:1)对化粪池的清理维护不够,选点地区农户很少对化粪池定期清理,降低了化粪池对污染物的去除效率;2)洗澡、洗漱、洗衣等多种生活污水纳入化粪池,稀释污染物浓度和缩短污染物停留时间,影响化粪池对污染物的削减率。因此,统一规范农村化粪池的使用和维护过程对于提高化粪池效能尤为必要。

### 3 结论

1)区域气温、湿度、降水对居民用排水习惯、饮食习惯、化粪池纳污来源有较大影响,导致选点地区农村化粪池污染物浓度的差异,污染指数由东南沿海向西北内陆省份呈递增趋势。

2)各选点区域化粪池对COD、BOD<sub>5</sub>、TP、AVO的削减率表现为广东>浙江>湖南>重庆>山西>陕西,但对NH<sub>3</sub>-N、TN未有明显削减,区域气候特征是主要的影响因素。

3)随着水冲式卫生厕所在我国广大农村的普及,针对化粪池采取统一规范的管理措施对于提升农村水环境质量尤为必要。

### 参考文献

- [1] SINGH R P, KUN W, FU D. Designing process and operational effect of modified septic tank for the pre-treatment of rural domestic sewage[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 251: 109552.
- [2] WITHERS P J A, JARVIE H P, STOATE C. Quantifying the impact of septic tank systems on eutrophication risk in rural headwaters[J]. *Environment International*, 2011, 37(3): 644-653.
- [3] 王家,夏颖,范先鹏,等.三峡库区农村污水排放现状调查与分析[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(23): 5843-5847.
- [4] 赵琦,黄江平,韦日荣,等.2015—2017年广西农村环境健康危害因素分析[J]. *应用预防医学*, 2020, 26(1): 17-22.
- [5] 王晓红,周君.2017年唐山市农村环境卫生监测结果[J]. *职业与健康*, 2019, 35(2): 231-233.
- [6] 谢丽丽,王东海,郑建刚.2016年江西省农村环境卫生相关居民行为方式调查[J]. *现代预防医学*, 2017, 44(24): 4433-4436.
- [7] 刘国华.浅谈尧都区汾河流域区域范围建制镇污水治理现状及治理方式[J]. *建材发展导向(下)*, 2020, 18(5): 1-2.
- [8] 易雨辰,刘海香.赣州市兴国县蕉溪村饮用水现状及解决建议[J]. *城市地理*, 2017(20): 241.
- [9] 秦岭,朱鸿斌.2011—2014年四川省农村环境卫生状况调查[J]. *中国农村卫生事业管理*, 2016, 36(5): 591-593.
- [10] WITHERS P J A, MAY L, JARVIE H P, et al. Nutrient emissions to water from septic tank systems in rural catchments: Uncertainties and implications for policy[J]. *Environmental Science & Policy*, 2012, 24: 71-82.
- [11] YATES C A, JOHNES P J, SPENCER R G M. Characterisation of treated effluent from four commonly employed wastewater treatment facilities: A UK case study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 919-927.
- [12] 张博伦.一带一路战略实施与中国农村厕所革命[J]. *中国战略新兴产业*, 2018(12): 184.
- [13] 王玉华,方颖,焦隽.江苏农村“三格式”化粪池污水处理效果评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(2): 80-83.



- [14] LEW B, LUSTIG I, BELIAVSKI M, et al. An integrated UASB-sludge digester system for raw domestic wastewater treatment in temperate climates[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(7): 4921-4924.
- [15] 环境保护部. 水质化学需氧量的测定重铬酸盐法: HJ 828-2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [16] 环境保护部. 水质五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)的测定稀释与接种法: HJ 505-2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [17] 环境保护部. 水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法: HJ 535-2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [18] 环境保护部. 水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [19] 国家环境保护局. 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法: GB 11893-1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [20] 环境保护部. 水质石油类和动植物油类的测定红外分光光度法: HJ 637-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [21] 国家质量技术监督局. 数据的统计处理和解释正态性检验: GB 4882-2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [22] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(4): 185-190.
- [23] 国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [24] 陈中笑, 程军, 郭品文, 等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. *大气科学学报*, 2010, 33(6): 667-679.
- [25] LUOSTARINEN S, SANDERS W, KUJAWA-ROELEVELD K, et al. Effect of temperature on anaerobic treatment of black water in UASB-septic tank systems[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(5): 980-986.
- [26] HENZE M, LEDIN A. Types, characteristics and quantities of classic, combined domestic wastewaters[M]//LENS P, ZEEMAN G, LETTINGA G. *Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation*. Chapter 4. London: IWA Publishing, 2001: 59-72.
- [27] PATTERSON R A. Temporal variability of septic tank effluent[C]//PATTERSON R A, JONES M J. *Future directions for on-site systems: Best management practice proceedings of on-site '03 conference*. New South Wales, 2003: 305-312.
- [28] IGNATIUS I, JOWETT E C. The effect of household chemicals on septic tank performance receiving dilute wastewater[C]//*American Society of Agricultural and Biological Engineers. The 2004 ASAE Conference*. California, 2004: 358-367.
- [29] 丁慧, 关华滨, 陈志强. 寒冷地区化粪池的效果评价和探讨[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(8): 78-82.
- [30] ELMITWALLI T A, SHALABI M, WENDLAND C, et al. Grey water treatment in UASB reactor at ambient temperature[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 55(7): 173-180.
- [31] VIRARAGHAVAN T. Influence of temperature on the performance of septic tank systems[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1977, 7(1): 103-110.
- [32] 廖要明, 陈德亮, 刘秋锋. 中国地气温差时空分布及变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(4): 374-384.
- [33] 卢爱刚, 康世昌, 庞德谦. 地形对中国气温季节分布格局的差异影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1450-1452.
- [34] ZHANG C, JIANG Y, JIN J, et al. Research and evaluate on wastewater treatment of septic tank[C]//*Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP)*. Xi'an, 2011: 1244-1246.
- [35] 韦昆. 一种用于农村生活污水预处理的新型化粪池[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [36] LOHANI S P, BAKKE R, KHANAL S N. A septic tank-UASB combined system for domestic wastewater treatment: A pilot test[J]. *Water & Environment Journal*, 2016, 29(4): 558-565.
- [37] 王慧娜, 赵小锋, 唐立娜, 等. 城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷: 以厦门市为例[J]. *生态学报*, 2013, 33(14): 4495-4504.
- [38] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.

- [39] SABRY T. Evaluation of decentralized treatment of sewage employing upflow septic tank/baffled reactor (USBR) in developing countries[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1/2/3): 500-505.
- [40] AL-SHAYAH M, MAHMOUD N. Start-up of an UASB-septic tank for community on-site treatment of strong domestic sewage[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(16): 7758-7766.
- [41] 刘忠宽, 汪诗平, 韩建国, 等. 放牧家畜排泄物N转化研究进展[J]. *生态学报*, 2004, 24(4): 775-783.
- [42] 房景燕, 付永胜, 朱杰, 等. UASB处理畜禽废水的氨化率研究[J]. *污染防治技术*, 2007, 20(5): 20-23.
- [43] 王应红, 黄健敏, 龙炳清, 等. 有机污水生物脱氮除磷的生化机理、影响因素及工艺[J]. *环境研究与监测*, 2002, 15(2): 109-112.
- [44] 孙蕾. 小型污水处理设施在农村水环境治理中的应用[J]. *给水排水*, 2014, 40(s1): 193-196.
- [45] 谢欣妤. 人工强化植物栽培系统资源化处理黑水的特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [46] 汤博, 许明珠, 徐志荣, 等. 浙江省农村生活污水处理工艺对比分析及适用性研究[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(14): 3597-3600.
- [47] NASR F A, MIKHAEL B. Treatment of domestic wastewater using modified septic tank[J]. *Desalination Water Treatment*, 2014, 56(8): 1-9.
- [48] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 农村户厕卫生规范: GB 19379-2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- [49] 关华滨. 新型化粪池处理生活污水的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [50] 顾嗣亮. 我国气候地貌的基本特征与分区初探[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 1988, 1(2): 115-122.
- (本文编辑: 金曙光)

## Pollutant-removal performance of rural septic tank and its influencing factors

WANG Hao, WANG Junneng, CHEN Yao, ZHENG Wenli, GUO Qingwei, CHEN Sili, CAI Nan\*, LI Mingbin, LIN Xingzhou

South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China

\*Corresponding author, E-mail: cainan@scies.org

**Abstract** To further understand the current working status of septic tanks in rural areas of China, it is necessary to explore the specific pollutant-removal efficiency of rural septic tanks and identify the main influencing factors. In this study, 57 typical rural septic tanks from Shanxi, Shaanxi, Zhejiang, Hunan, Guangdong, and Chongqing provinces were investigated. The results indicated that the removal rates of COD, BOD<sub>5</sub>, ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), animal and vegetable oils (AVO) were 21%~65%, 29%~72%, -12%~-2%, 4%~12%, 7%~21%, 34%~62%, respectively, and total removal rates ranked were Guangdong > Zhejiang > Hunan > Chongqing > Shanxi > Shaanxi. Due to the influence on residents' drainage habits and the source of sewage in septic tanks, temperature and humidity in air, and precipitation were highly related to the concentration of pollutants and its removal efficiency. The results are expected to provide basic information for improving performance of septic tanks and making policy relevant to rural areas of China.

**Keywords** beautiful countryside; toilet revolution; rural septic tank; domestic black water; removal rates