

《环境工程学报》稿件定稿及发排单

(此单由栏目责编填写后嵌入稿件文题之前)

投稿时的文章题目:农村化粪池污染物去除效果及影响因素分析

栏目责编确认的文题:我国农村化粪池污染物去除效果及影响因素分析

编辑部主任意见:

稿件定稿及发排基本信息表

稿件编号	202008129	是否加急处理	否
第一作者	汪浩	通信作者	蔡楠
第一单位	生态环境部华南环境科学研究所		
是否优先发表	否	优先发表理由	无
投稿栏目	固体废物处理与资源化	责编确认栏目	固体废物处理与资源化
作者修回日期	2020-12-07	作者修改态度	较好
附图数量	4	附表数量	3
中文摘要审核人	金曙光	审结日期	2020-12-10
结论审核人	金曙光	审结日期	2020-12-10
英审专家(拟送)	陶雪	计划英审日期	2020-12-12
版面费信息	(是否按特殊标准)		
其他备注信息			

上传 XML 系统日期: 上传者签名:

栏目编辑签名:金曙光 日期: 2020-12-11

编辑部主任签名: 日期:

注:稿件定稿后,由栏目编辑填写定稿发排单,经编辑部主任审核无误并签字后,再由栏目编辑送英审和制图,英审制图完成后由栏目编辑上传至 XML 一体化排版校对系统。

15 我国农村化粪池污染物去除效果及影响因素分析

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

17 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510530

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

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

20 基金项目: 生活源与集中式污染治理设施产排污核算方法及指南编制项目(14402800000175027)

21 收稿日期: 2020-08-14; 录用日期: 2020-12-11

22 DOI 10.12030/j.cjee.202008129 中图分类号 X703 文献标识码 A

23 **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、
24 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
25 因素。研究结果选点表明区域化粪池对化学需氧量(COD_{Cr})、5 日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷
26 (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
27 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
28 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理论依据。

29 **关键词** 美丽乡村; 厕所革命; 农村化粪池; 生活黑水; 削减率

30 **Pollutant-removal performance of rural septic tank and its impacting** 31 **factors**

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

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

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

36 **Abstract** To further understand the current working status of septic tanks in rural areas of China, it is necessary to investigate the
37 specific pollutant-removal efficiency of rural septic tanks and identify the key influences nationally. In this study, 57 typical rural septic
38 tanks from Shanxi, Shaanxi, Zhejiang, Hunan, Guangdong, and Chongqing provinces were investigated. The results indicated that large
39 differences were presented at the concentration of pollutants and their treatment efficiencies. The removal rates of COD_{Cr}, BOD₅,
40 Ammonia nitrogen (NH₃-N), Total nitrogen (TN), Total phosphorus (TP), Animal and vegetable oils (AVO) were 21%~65%, 29%~72%,
41 -12%~-2%, 4%~12%, 7%~21%, 34%~62% respectively, and total removal rates ranked were Guangdong > Zhejiang > Hunan >
42 Chongqing > Shanxi > Shaanxi. From results, temperature and humidity in air, and precipitation were highly related to the concentration
43 of pollutants and the removal efficiency of pollutants, because types of sewages inflowing, the water-using habits of villager, dietary
44 habits have effects on them. The results are expected to provide basic information for improving performance of septic tanks and making

53 policy relevant to rural areas of China.

54

55 **Keywords** countryside beautification; toilet revolution; rural septic tank; domestic black water; removal efficiency

56

57 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
58 对粪、尿等高浓度生活污水过滤和预处理作用的初级装置^[1]。化粪池中污染物浓度通常较高, 其污染负荷占
59 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
60 供有机肥料, 改善出水水质, 减小农村水环境污染^[2-3]。依据 2016 年第三次全国农业普查结果, 我国配备水
61 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%、
62 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
63 比较高^[4,9], 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^[10-11]。随着
64 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、改善农村人居环境卫生条件尤为关键^[12]。

65 “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
66 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
67 污染物持续厌氧发酵, 最后在第 3 格贮存和溢排^[13]。另外, 生物厌氧发酵、气温变化、纳污强度、纳污类
68 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
69 去除效果^[14]。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
70 进、出水水质, 对比各地化粪池对主要污染指标的处理效果, 分析了潜在影响因素, 为深入了解我国农村家庭
71 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支撑。

72

73 1 实验方法

74 1.1 布点与监测

75 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、
76 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
77 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
78 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
79 数有所差异, 为 1.5~3.0 m³。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
80 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
81 次、天数有所变动 (表 1)。

82 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
83 池连接处和化粪池出水口处, 采集时间每日 7:00~9:00、11:00~13:00、15:00~19:00, 将 3 次采集的化粪池进、

84 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
 85 检测分析。

86 表 1 典型农户化粪池分布与监测信息

87 Table 1 Information for distribution and sampling of rural septic tanks

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

88 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、各省份农村居民人均可支配收入，数据来自 2019 年各
 89 省份、地市统计年鉴

90 1.2 检测指标与方法

91 本研究检测的 6 项指标为化学需氧量 (COD_{Cr})、5 日生化需氧量 (BOD₅)、氨氮 (NH₃-N)、总氮 (TN)、
 92 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) [15]、稀释接种法 (HJ 505-
 93 2009) [16]、纳氏试剂分光光度法 (HJ 535-2009) [17]、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (HJ 636-2012) [18]、
 94 钼酸铵分光光度法 (GB 11893-1989) [19]、红外分光光度法 (HJ 637-2012) [20]。

95 1.3 数据处理与分析

96 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
 97 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)
 98 [21]；指标间逻辑关系（例如，生活污水的 COD_{Cr}/BOD₅ 范围为 1/3~2/3，NH₃-N 小于 TN）；采样现场状况，
 99 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
 100 statistics25 软件进行处理分析。

101 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 [22]。本
 102 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分析，为量化不同来源水体的潜在污染指数提
 103 供依据。

104
$$P_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

105
$$P_i = \frac{C_i}{C_s} \quad (2)$$

106 式中： P_c 为水体综合污染指数； P_i 是污染物 i 的水质污染指数。 n 是参与评价的污染物数量。 C_i 是污染物 i
 107 的特征浓度值。 C_s 是污染物 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
 108 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)
 109 中的一级 A 排放标准 [23]。

110

111 2 结果与讨论

112 2.1 检测结果

113 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
114 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
115 比，农村住户居住分散，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^[2,24]。本研究参考
116 综合污染指标的计算公式，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 ，结果显示陕西和重庆
117 的化粪池污染指数最高，其次为湖南和山西，最后为广东和浙江，整体呈现为内陆到沿海省份逐渐递减的趋
118 势。

119

120

121

表 2 农村居民家庭化粪池污染指标检测结果

Table 2 Determination results of discharge of rural septic tanks $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

省份	类型 ¹	COD _{Cr}	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	AVO	P_c
		<i>ave±std</i>	<i>ave±std</i>	<i>ave±std</i>	<i>ave±std</i>	<i>ave±std</i>	<i>ave±std</i>	
山西	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	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	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	13.5.2±3.6	3.8±2.6	17.02
湖南	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	26.1.8±10.6	6.9±3.7	22.26
广东	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	16.9.8±7.3	3.1±2.6	16.14
重庆	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

122

1 指分别用进、出表示化粪池进出、口端污水类型。

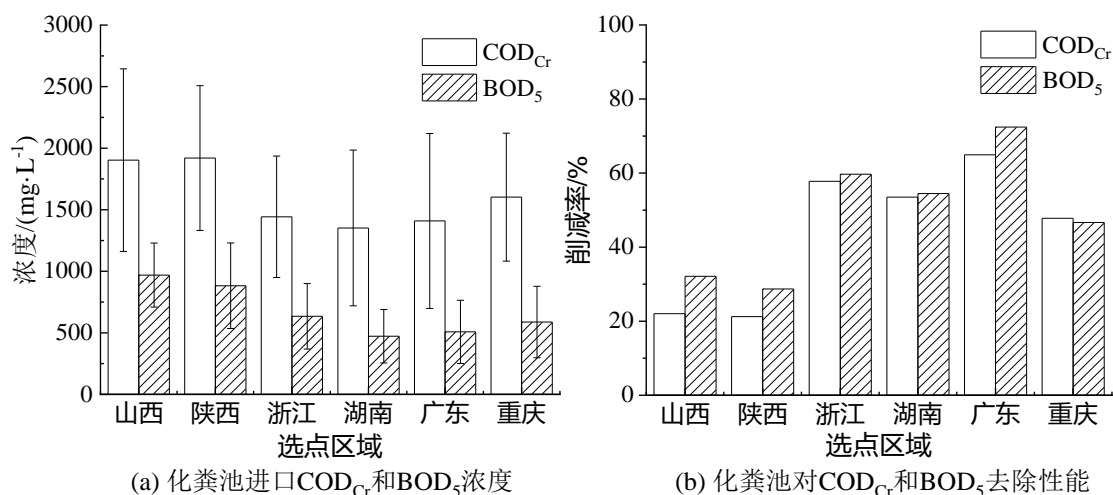
123

124 2.2 指标对比分析

125 1) COD_{Cr} 与 BOD₅

126 本研究测得化粪池进口的 COD_{Cr} 和 BOD₅ 浓度的范围分别为 1300~2000 和 400~900 mg·L⁻¹, 与相关研
127 究结果基本一致^[13, 25-26]。各选点化粪池进口的 COD_{Cr} 和 BOD₅ 浓度差异在一定程度上反映了农户产生黑水
128 的强度和洗澡、洗涤等生活习惯的不同^[27-28]。各选点化粪池进口 COD_{Cr} 浓度差异大体呈现陕西>山西>重庆>
129 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、
130 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
131 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
132 少见, 导致化粪池含水量更低, 本研究现场采集到的化粪池水样整体更为浑浊, 测得污染物特征浓度更高。

133 各选点化粪池对 COD_{Cr} 与 BOD₅ 的削减率如图 1 (b) 所示, 广东选点化粪池对 COD_{Cr} 和 BOD₅ 的削减
134 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
135 点地区农村化粪池 COD_{Cr} 和 BOD₅ 削减率分别为 45±19%和 49±17%。王玉华等^[13]研究表明, 江苏农村化粪
136 池对 COD_{Cr} 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
137 黑水 COD_{Cr} 的削减率为 40%~50%, 本研究中 6 片区的 COD_{Cr} 均值较上述结论较为接近, 但广东、浙江对应
138 COD_{Cr} 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
139 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
140 细小颗粒物依然影响指标检测结果。丁慧等^[29]研究表明, 化粪池对颗粒态物质的滤过性是 COD_{Cr} 削减的主
141 要来源; Zhang 等^[30]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
142 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
143 解作用和化粪池对 COD_{Cr} 与 BOD₅ 的生物降解效率^[30-31]。依据各地统计年鉴, 山西、陕西、浙江、湖南、
144 广东、重庆 2018 年年均气温为 (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。
145 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, 有利于化粪池菌群生长和对污染物生化
146 降解^[32-33]。



(a) 化粪池进口COD_{Cr}和BOD₅浓度

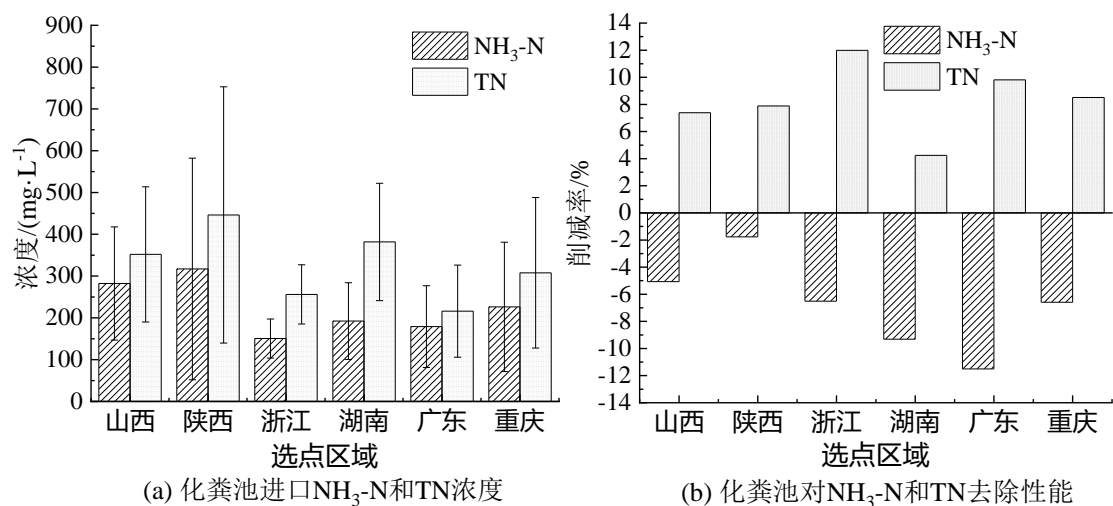
(b) 化粪池对COD_{Cr}和BOD₅去除性能

图 1 选点区域化粪池进口 COD_{Cr} 和 BOD₅ 浓度及其削减率

Fig. 1 Concentrations and removal rates of COD_{Cr} and BOD₅ of septic tanks in regions

2) NH₃-N 和 TN

化粪池黑水是居民生活污水 NH₃-N 和 TN 的主要排放源。本研究中各选点化粪池的 NH₃-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 NH₃-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^[13, 34-35]。本研究入户调查表明, 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、NH₃-N 浓度。这一差异可能是导致陕西和山西化粪池 NH₃-N 和 TN 浓度较其他省份高的主要原因。



(a) 化粪池进口NH₃-N和TN浓度

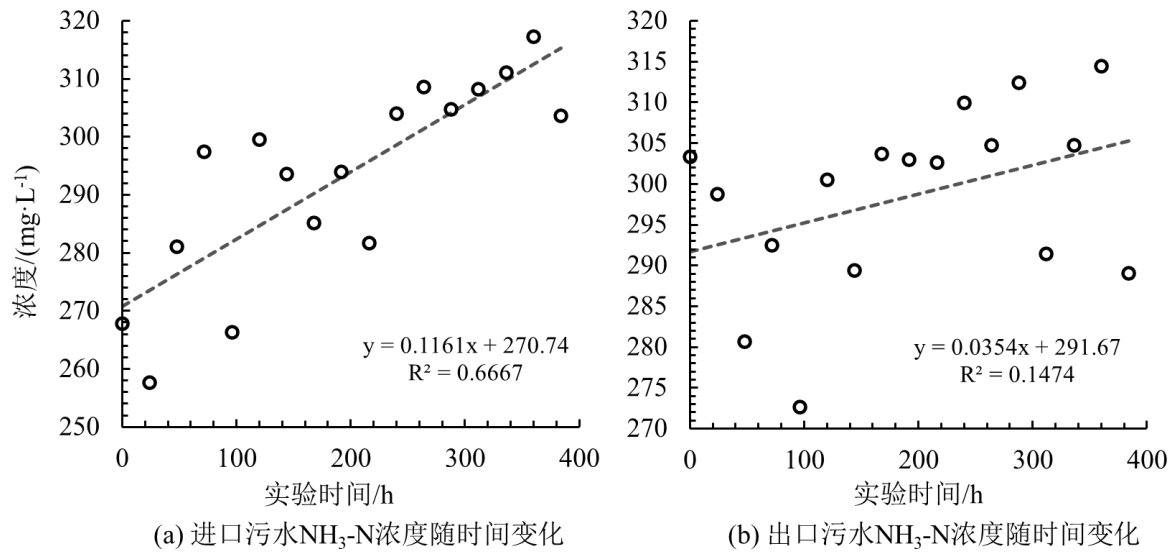
(b) 化粪池对NH₃-N和TN去除性能

图 2 选点区域化粪池进口 NH₃-N 和 TN 浓度及其削减率

Fig. 2 Concentrations and removal rates of NH₃-N and TN of septic tanks in regions

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^[35-36], 山西和陕西污水浓度高、停留时间长、更新慢, 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 NH₃-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 NH₃-N 浓度呈现波动式上升趋势, 而出口水样的 NH₃-N 浓度较为稳定。这一差异说明含

164 氮有机物的厌氧氨化作用是导致化粪池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 削减不佳的关键原因 (图 3)。



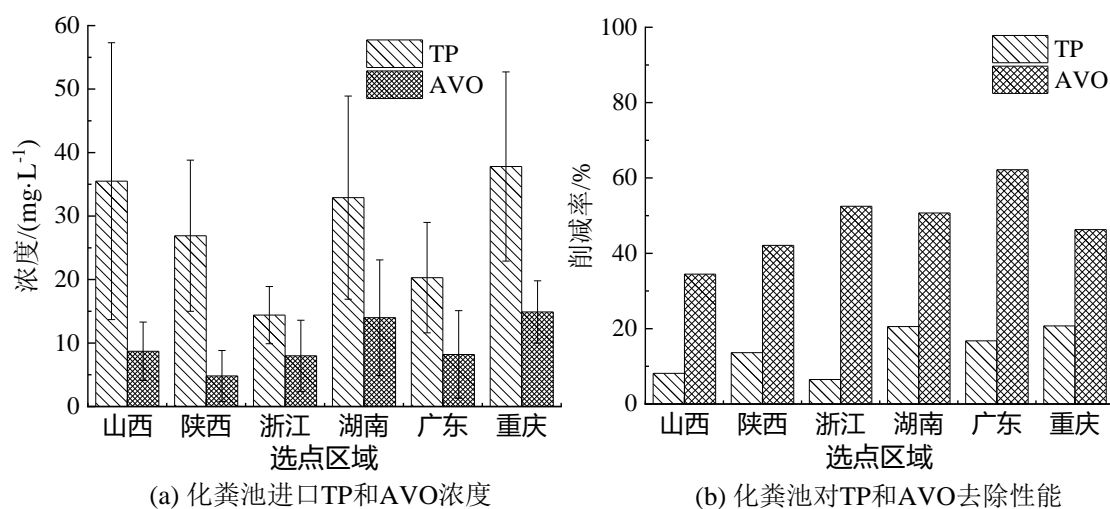
165
166 **图 3 化粪池进、出口污水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在无氧条件下的变化特征**

167 **Fig. 3 Dynamic characteristics of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations of inlet- and outlet sewages of septic tanks at the**
168 **anaerobic condition**

169 3) TP 和 AVO

170 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
171 的 TP 浓度较高。王慧娜等^[37]研究认为, 人均收入和食品价格指数的增加会降低人均摄入磷素量, 可能影响
172 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
173 为 1.17、1.12、2.73、1.41、1.72、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
174 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^[37]研究结果较为吻合。由于化粪池中 TP
175 浓度受容纳水体类型、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, 关于上述结果仍需
176 要进一步验证。

177 重庆、湖南选点化粪池较广东、浙江高的 AVO 浓度可能归因于湖南和重庆饮食偏油偏辣, 当地居民摄
178 入 AVO 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
179 费量分别为 12.4、9.2、12.1、14.8 kg^[38], 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
180 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
181 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。
182 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 的削减率未表现明显规律,
183 可能受居民磷摄入量、化粪池混排特征等多因素影响^[34, 37]。各选点化粪池对 AVO 的削减率为广东>浙江>湖
184 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
185 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。



(a) 化粪池进口TP和AVO浓度

(b) 化粪池对TP和AVO去除性能

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

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_{Cr} 和 BOD_5 的进、出口浓度与各地区年均降水量的负相关性最强，其次和气温、湿度也有较好的负相关性。降水量一定程度反映了各区域水资源可获得性，即水资源易获得区域的农村居民化粪池 COD_{Cr} 、 BOD_5 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_{Cr} 、 BOD_5 的削减率正相关，一定程度说明农户稳定的排水量、较高的温度有利于化粪池对 COD_{Cr} 、 BOD_5 的去除^[39-40]。根据本研究调查发现，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，导致化粪池 NH_3-N 浓度被稀释。另外，本研究观察到，化粪池 NH_3-N 去除率与温度反相关，即温度越高， NH_3-N 浓度越高，削减率越低。刘忠宽等^[41]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^[42]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。结合本研究各片区 NH_3-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_3-N 效率不佳的关键原因。TN 与 4 个影响因素均不显著相关，可能是 TN 来源较为分散、受影响因素较多。AVO 的削减率与气温、降雨量显著正相关，说明较高的气温、稳定的排水量有利于 AVO 的削减。

表3 化粪池指标与影响因素相关性分析

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

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 _{Cr}	进口	-0.830*	-0.894*	-0.927**
BOD ₅	进口	-0.901*	-0.977**	-0.895*
NH ₃ -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 _{Cr}	出口	-0.892*	-0.926**	-0.968**
BOD ₅	出口	-0.928**	-0.956**	-0.971**
NH ₃ -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 _{Cr}	削减率	0.911*	0.919**	0.983**
BOD ₅	削减率	0.901*	0.845*	0.988**
NH ₃ -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**

207 **指在 0.01 级别（双尾），相关性显著；*指在 0.05 级别（双尾），相关性显著

208

209 2.4 讨论

210 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，和微生物发酵作用降解掉部分溶解态污染
 211 物达到对黑水的削减。LEW 等^[4]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_{Cr} 去除效率
 212 是溶解态 COD_{Cr} 的 2 倍多；如果考虑各类 COD_{Cr} 占总 COD_{Cr} 的比重，前者削减率是后者的 4~9 倍。黑水中
 213 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
 214 的沉淀\过滤作用主要发生在第一格，生物降解作用主要发生在第二格，化粪池结构的合理性是保证其良好
 215 运转的关键。

216 化粪池对 NH₃-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
 217 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 NH₃-N 浓度增加的主要原因。
 218 化粪池因生化作用而缺氧，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^[43]。
 219 为降低生活污水中 NH₃-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
 220 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
 221 质^[44-46]。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
 222 结合区域特征，因地制宜^[14, 47]。

223 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^[48]，其中 3

224 个格子的停留时间为 2:1:3。本研究现场调查表明,山西、陕西农村居民化粪池主要收集冲厕污水;浙江、
225 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,导致化粪池进水水量大于其理论设计容
226 量,稀释粪污浓度、缩短了水力停留时间。按照本研究现场监测结果,山西、陕西、浙江、湖南、广东、重
227 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
228 区粪污水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^[35]模拟了水力停留时间对化粪池处
229 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%、
230 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
231 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
232 响较小。关华滨^[49]研究表明,相同温度下,灰水在化粪池中停留 48、84h 后。COD 的去除率分别为 71%、
233 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%,表明水力停留
234 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、
235 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
236 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。

237 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^[14]
238 研究表明,当反应温度从 10 °C 提高到 28 °C,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
239 解速率提高了 1.5 倍;总 COD_{Cr} 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
240 由南向北、自东向西的气温递减和年温差增大的趋势^[50]。随着水冲厕在我国北方地区的普及,解决低温条
241 件下化粪池的去污效能低的问题尤为关键^[29]。

242 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:一、对化粪池的清理维护不
243 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;二、洗澡、洗漱、洗衣等多
244 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
245 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。

246 3 结论

248 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
249 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。

250 2) 各选点区域化粪池对 COD_{Cr}、BOD₅、TP、AVO 的削减率表现为广东>浙江>湖南>重庆>山西>陕西,
251 但对 NH₃-N、TN 未有明显削减,区域气候特征是主要的影响因素。

252 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
253 环境质量尤为必要。

254 参 考 文 献

255

256 [1]SINGH R P, KUN W, FU D. Designing process and operational effect of modified septic tank for the pre-treatment of
257 rural domestic sewage[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 251: 109552.

258 [2]WITHERS P J A, JARVIE H P, STOATE C. Quantifying the impact of septic tank systems on eutrophication risk in
259 rural headwaters[J]. Environment International, 2011, 37(3): 644-653.

260 [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.

261 [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.

262 [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): 231-233,241.

263 [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):
264 4433-4436.

265 [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.

266 [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, 1(20): 241.

267 [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.

268 [10]WITHERS P J A, MAY L, JARVIE H P, et al. Nutrient emissions to water from septic tank systems in rural catchments:
269 Uncertainties and implications for policy[J]. Environmental Science & Policy, 2012, 24: 71-82.

270 [11]YATES C A, JOHNES P J, SPENCER R G M. Characterisation of treated effluent from four commonly employed
271 wastewater treatment facilities: A UK case study[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 919-927.

272 [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): 184-184.

273 [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-
274 83.

275 [14]LEW B, LUSTIG I, BELIAVSKI M, et al. An integrated UASB-sludge digester system for raw domestic wastewater
276 treatment in temperate climates[J]. 2011, 102(7): 4921-4924.

277 [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: 中国环境出版社, 2017.

278 [16]环境保护部. 水质五日生化需氧量(BOD₅)的测定稀释与接种法:HJ 505-2009[S]. 北京: 中国环境出版社, 2009.

279 [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: 中国环境出版社, 2009.

280 [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: 中国环境出版社,
281 2012.

282 [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.

283 [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:中国环境出版社, 2012.

284 [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.

285 [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):
286 185-190.

287 [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.

288 [24]LIU Z H. Current Situation and Main Pollution Sources of Rural Water Environment in China[J]. Advanced Materials
289 Research, 2011, 281: 113-116.

290 [25]LUOSTARINEN S, SANDERS W, KUJAWA-ROELEVELD K, et al. Effect of temperature on anaerobic treatment of
291 black water in UASB-septic tank systems[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(5): 980-986.

292 [26]HENZE M, LEDIN A. Types, characteristics and quantities of classic, combined domestic wastewaters[J].
293 Decentralised sanitation and reuse, Lens, P.; Zeeman, G.; Lettinga, G., Eds. IWA Publishing: London, 2001; Vol. Chapter
294 4: 59-72.

295 [27]PATTERSON R A. Temporal Variability of Septic Tank Effluent. In Future Directions for On-site Systems: Best
296 Management Practice[J]. Proceedings of On-site '03 Conference, Patterson, R. A.; Jones, M. J., Eds. Lanfax Laboratories
297 Armidale: University of New England, 2003: 305-312.

298 [28]IGNATIUS I, JOWETT E C. In The effect of household chemicals on septic tank performance receiving dilute
299 wastewater, the 2004 ASAE Conference, Sacramento CA, 2004; Joseph, S., Ed. ASABE: Sacramento CA, 2004; pp 358-

300 367
301 [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.
302 [30]ZHANG C, JIANG Y, JIN J, et al. Research and evaluate on Wastewater Treatment of septic tank[J]. ISWREP 2011 -
303 Proceedings of 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection, 2011, 2: 1244-1246.
304 [31]VIRARAGHAVAN T. Influence of temperature on the performance of septic tank systems[J]. Water, Air, & Soil
305 Pollution, 1977, 7(1): 103-110.
306 [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
307 [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.
308 [34]CHAO Z, YINGHE J, JIANHUA J, et al. In Research and evaluate on Wastewater Treatment of septic tank, 2011
309 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection, 20-22 May 2011, 2011; 2011; pp 1244-1246.
310 [35]韦昆. 一种用于农村生活污水预处理的新型化粪池[D]. 长沙:东南大学, 2017.
311 [36]LOHANI S P, BAKKE R, KHANAL S N. A septic tank-UASB combined system for domestic wastewater treatment:
312 a pilot test[J]. Water & Environment Journal, 2016, 29(4): 558-565.
313 [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,
314 2013, 33(14): 4495-4504.
315 [38]国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2019: 189-190.
316 [39]SABRY T. Evaluation of decentralized treatment of sewage employing Upflow Septic Tank/Baffled Reactor (USBR)
317 in developing countries[J]. Journal Of Hazardous Materials, 2010, 174(1-3): 500-505.
318 [40]AL-SHAYAH M, MAHMOUD N. Start-up of an UASB-septic tank for community on-site treatment of strong
319 domestic sewage[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(16): 7758-7766.
320 [41]刘忠宽, 汪诗平, 韩建国, 陈佐忠, 王艳芬. 放牧家畜排泄物 N 转化研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 775-
321 783.
322 [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, 020(005): 20-23.
323 [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,
324 (2): 109-112.
325 [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, (s1): 193-196.
326 [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.
327 [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,
328 55(14): 3597-3600.
329 [47]NASR F A, MIKHAEIL B. Treatment of domestic wastewater using modified septic tank[J]. Desalination Water
330 Treatment, 2014, 56(8): 1-9.
331 [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:GB19379-2012[S]. 北京: 中国质检
332 出版社, 2012.
333 [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.
334 [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.
335