

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.009

# 湖南省农村生活污水产污特征及影响因素分析

张文强<sup>1,2</sup>, 刘璐<sup>1,2</sup>, 胡飞超<sup>1,2</sup>, 庞阔<sup>1,2</sup>, 郭亚丽<sup>3,4</sup>, 张婷<sup>3,4</sup>,  
李敏<sup>1,2</sup>

(1. 北京林业大学环境科学与工程学院 水体污染源控制技术北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 污染水体源控制与生态修复技术北京市高等学校工程研究中心, 北京 100083; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 4. 中国长江三峡集团有限公司 长江生态环境工程研究中心<上海>, 上海 200335)

**摘要:** 以湖南省不同地形11个典型农村的农户为研究对象,对农户进行实地调研并对其各类生活污水进行采样监测,分析农户生活污水的产污特征及影响因素。结果表明,厨房、洗漱和厕所污水的污染物浓度分别在06:00—10:00、14:00—18:00和18:00—22:00时段最高;农户排水量在18:00—22:00时段最大。逐日监测结果表明,周末平原与丘陵地区厨房污水的水质较差。农户厨房、洗漱和厕所生活污水混合后的COD、SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN和TP浓度加权中位值分别为663.6、106.0、58.2、95.1和10.3 mg/L, C/N值为7.0。农户人均日排水量为平原(77 L)>山地(53 L)≈丘陵(50 L)。季节监测发现,丘陵地区生活污水的水质季节性波动较大。影响因素分析表明,地形、季节和收入水平是影响湖南省农村生活污水水质特征的主要因素。

**关键词:** 生活污水; 产污特征; 影响因素; 湖南省; 农村

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0055-06

## Characteristics and Influencing Factors of Rural Domestic Sewage in Hunan Province

ZHANG Wen-qiang<sup>1,2</sup>, LIU Lu<sup>1,2</sup>, HU Fei-chao<sup>1,2</sup>, PANG Kuo<sup>1,2</sup>, GUO Ya-li<sup>3,4</sup>,  
ZHANG Ting<sup>3,4</sup>, LI Min<sup>1,2</sup>

(1. *Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;*  
2. *Engineering Research Center for Water Pollution Source Control & Eco-remediation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;* 3. *Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200335, China;* 4. *Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center <Shanghai>, China Three Gorges Corporation, Shanghai 200335, China*)

**Abstract:** The field investigation of local farmers were carried out and different kinds of household sewage from 11 typical rural areas of Hunan Province with different terrains were sampled and monitored to analyze their pollution characteristics and influencing factors. The concentrations of pollutants in the wastewater from kitchen, washing and toilet were the highest from 06:00 to 10:00, 14:00 to 18:00 and

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003082)

通信作者: 李敏 E-mail: minli@bjfu.edu.cn

18:00 to 22:00, respectively. The maximum flow rate of household sewage was observed during the period from 18:00 to 22:00. The daily monitoring results showed that the quality of kitchen wastewater was poor in plain and hilly areas on weekends. The weighted median values of COD, SS,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN and TP in mixed household sewage from kitchen, washing and toilet were 663.6 mg/L, 106.0 mg/L, 58.2 mg/L, 95.1 mg/L and 10.3 mg/L, respectively, and the C/N ratio was 7.0. The per capita daily flow rates of rural household were 77 L in plain, 53 L in mountainous area, and 50 L in hill region. The seasonal monitoring data showed that the quality of domestic sewage in hilly areas fluctuated greatly in seasons. The analysis of the influencing factors showed that terrain, season and income level were the main factors affecting the quality of rural domestic sewage in Hunan Province.

**Key words:** domestic sewage; pollution characteristics; influencing factor; Hunan Province; rural area

我国农村人口众多,大量生活污水未经处理直接排放会严重影响农村生活环境和居民身体健康。随着农村建设的不断推进和公众环境意识的不断提高,对农村生活污水进行治理正逐渐成为热点。目前,对我国农村生活污水产污特征的研究大多集中在滇池、巢湖等重要流域周边<sup>[1]</sup>,针对长江中游地区农村生活污水产污特征的研究相对较少。我国地域广阔,由于不同地区自然条件、用水习惯和经济发展水平的差异,农村生活污水的水质水量也存在显著差异。因此,对我国不同地方的农村生活污水开展产污特征研究十分必要。笔者针对长江中游地区湖南省的农村生活污水排量、产生时间和污染物浓度展开系统调查,旨在为长江中游地区农村生活污水的治理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

湖南省地形多为丘陵和山地,属于大陆性亚热带季风湿润气候,光、热、水资源丰富。湖南省共13市、43 458个村、4 664.76万农村人口,约占湖南省总人口的63.94%,人均年可支配收入为16 584.6元。湖南省集中供水行政村的比例为61.26%,农村供水普及率为64.74%,农村居民人均用水量为90.77 L/d<sup>[2-3]</sup>。

湖南省农村污水以排放生活污水为主,农村人均日生活污水量约为0.075~0.085 m<sup>3</sup>,人均年产生生活污水约为30 m<sup>3</sup>,全省农村地区年产生生活污水约为1.12×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>。湖南省有67.92%的建制镇和44.80%的乡对生活污水进行了处理,远低于长江中游安徽省(建制镇为84.82%,乡为85.77%)和湖

北省(建制镇为91.99%,乡为90.57%)的乡镇污水处理比例<sup>[3]</sup>,大量农村污水未经处理直接排放,导致长江中游水环境受到了严重威胁。

### 1.2 监测点设置

根据地形、人口和经济条件等因素,在湖南省选择了11个典型农村作为实地调研的案例,案例包含了丘陵、山地和平原三类地形特征,各调研点位置如图1所示。

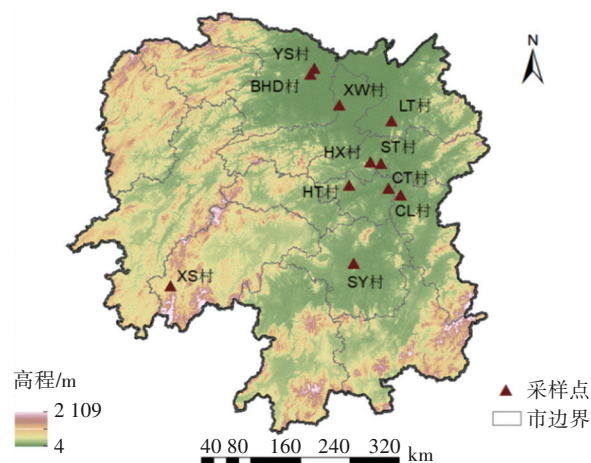


图1 调研点位置示意

Fig.1 Schematic diagram of location of surveyed points

### 1.3 采样方法

为了探究农户生活污水逐时段和逐日排放规律,分别于2021年12月2日—8日和2022年1月1日—7日对调研范围内11个农村的14家农户(见表1)生活污水进行两次连续7 d的采样,每天记录06:00—10:00、10:00—14:00、14:00—18:00、18:00—22:00和22:00—次日06:00五个时段的排水量,并进行采样分析。每次分别采集农户洗漱

间、厨房和厕所化粪池的污水各 1 500 mL,并记录家庭常住人口、取样时间。为探究农户生活污水季节性排放规律,分别于 2021 年春季(5 月)、夏季(7 月、8 月)、秋季(10 月、11 月)和冬季(12 月、2022 年 1 月)对调研范围内的 11 个农村进行采样,每次采集两家农户的厕所化粪池污水。

表 1 各采样点的基本情况

Tab.1 Basic information of each sampling point

农户	村庄地形	人均可支配 收入/元	农户常住人 口数/人
ST 农户	平原	32 232	2
HX 农户		32 232	3
LT 农户		16 878	8
CT 农户	山地	22 636	5
XS 农户 A		12 936	3
XS 农户 B			5
YS 农户		18 415	4
CL 农户	丘陵	25 657	2
SY 农户		23 499	7
BHD 农户		18 415	2
XW 农户 A		15 169	2
XW 农户 B			1
HT 农户 A		25 036	2
HT 农户 B			4

对 11 个农村的生活污水进行水质水量监测,分析湖南省农村水质的变化情况。对按天监测的农户生活污水,分析逐时段和逐日的水质水量变化。对按季度监测的农户生活污水,分析不同季节农户生活污水水质的变化情况。同时分析地形、季节、农户常住人口数和收入水平对农户生活污水水质水量的影响。

1.4 水质测试指标与分析方法

COD 参考《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)进行测定,氨氮参考《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)进行测定,SS 参考《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901—1989)进行测定,TN 参考《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)进行测定,TP 参考《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)进行测定。水量通过量筒测量和称重的方法进行测定。

为探讨湖南省农村混合生活污水的水质,通过统计各种污水不同污染物浓度的中位值,计算水质指标的加权中位值,加权中位值的计算见式(1)。

$$\bar{\rho}_i = \frac{\rho_{i1} \times P_1 + \rho_{i2} \times P_2 + \rho_{i3} \times P_3}{P_1 + P_2 + P_3}$$
 (1)

式中: $\bar{\rho}_i$ 为某水质指标的加权中位值,mg/L; $\rho_{i1}$ 、 $\rho_{i2}$ 、 $\rho_{i3}$ 分别为洗漱、厨房和厕所污水中该水质指标的中位值,mg/L; $P_1$ 、 $P_2$ 和  $P_3$  分别为洗漱、厨房和厕所污水人均排水量的中位值,L。

2 结果与分析

2.1 农村生活污水水质水量的时变化

不同地形各类污水水质的逐时段变化情况表明,平原和丘陵地区洗漱污水的污染物浓度在 14:00—18:00 达到最大,山地地区洗漱污水的污染物浓度在 18:00—22:00 达到最大。而厨房和厕所污水的污染物浓度主要在 06:00—10:00、10:00—14:00 和 18:00—22:00 三个时间段出现峰值,且在 06:00—10:00 和 18:00—22:00 时段的污染物浓度最高,这与农村居民用餐时间有关<sup>[5]</sup>。总体来看,COD 和 SS 浓度最高的是厨房污水,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 浓度最高的是厕所污水。平原地区洗漱和厨房污水的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 浓度以及厕所污水的各污染物浓度均高于其他地区。这是由于平原地区农村的经济条件较好,人们生活水平相对较高,使用动植物油、各种佐料和洗涤剂物质较多,导致 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 浓度较高<sup>[6]</sup>。

不同地形农村农户人均排水量逐时段变化情况如图 2 所示。

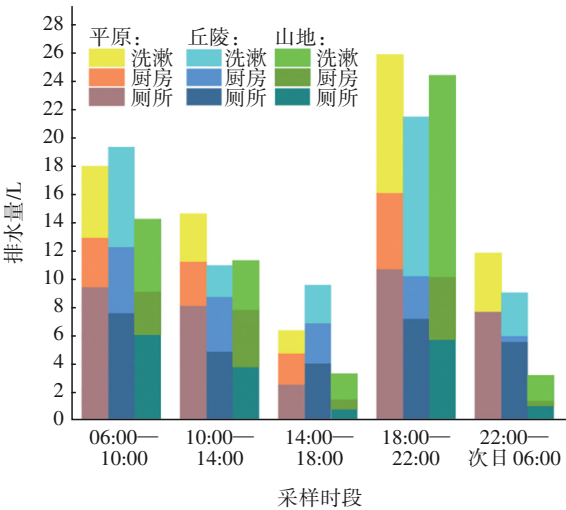


图 2 不同地形农村农户人均排水量逐时段变化情况

Fig.2 Time-by-period variation of per capita water discharge in rural areas with different terrains

从图 2 可知,不同地形的农村厕所污水排放量普遍高于洗漱污水和厨房污水,且平原地区农村总

排水量最大,丘陵地区次之,而山地农村总排水量最少。总体看来,每天的排水量变化可以分为4个时段:06:00—10:00为第Ⅰ时段,农户人员洗漱活动多、排水量大;10:00—18:00为第Ⅱ时段,农户外出人员多、排水量少;18:00—22:00为第Ⅲ时段,农户人员洗漱活动较多、排水量最大,平原、山地和丘陵地区农户人均排水量分别为25.8、21.4和24.2 L;22:00—次日06:00为第Ⅳ时段,人员活动较少,产生的污水主要以厕所污水为主,排水量较少。各地区人均排水量逐时段变化的规律均呈现早上略大、中午和下午略小、晚上又增大的特征,检测结果与人员活动的规律基本相符<sup>[5]</sup>。

## 2.2 农村生活污水水质水量的日变化

对农户生活污水进行连续一周的逐日监测,每天采集早、中、晚污水样品,得到不同地形农村生活污水水质的日变化情况。结果表明,不同地形农村洗漱和厕所污水水质在工作日的变化不大,而周末平原与丘陵地区厨房污水的水质较差。工作日洗漱污水的C/N值较高,为16.9~77.7,周末洗漱污水的C/N值为16.8~23.0。厨房和厕所污水的C/N值逐日变化不大,分别在14.1~34.6和3.6~6.7之间。这一结果与三峡库区、宁波地区和嘉兴地区农村各类生活污水的C/N值相差不大<sup>[7-9]</sup>。

通过统计各种污水不同污染物浓度的中位值,以水质指标的加权平均值代表农村各种生活污水混合后的水质,结果见表2。湖南省农村生活污水的COD、SS、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN和TP浓度的加权中位值分别为663.6、106.0、58.2、95.1和10.3 mg/L, C/N值为7.0,污水碳氮比较低<sup>[10]</sup>。

表2 农户生活污水监测指标统计结果

Tab.2 Statistical results of domestic sewage monitoring indicators of the households

项 目	人均排水量/ (L·d <sup>-1</sup> )	污染物浓度中位值/(mg·L <sup>-1</sup> )					C/N 值
		COD	SS	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	TN	TP	
洗漱污水	20.3	477.5	72.0	2.6	11.0	0.6	43.4
厨房污水	16.2	1 290.0	175.0	4.3	28.1	5.0	45.9
厕所污水	23.9	397.0	88.0	142.0	212.0	22.2	1.9

生活污水人均日排水量逐日变化情况如图3所示。可知,平原地区农村生活污水的人均日排水量最大,均值为77 L,山地与丘陵地区分别为53和50 L。这是由于平原地区农村的经济条件较好,其农户有着与城镇居民相近的生活习惯,故其污水排放

量远高于另外两个地区。各地区农村人均日排水量一周内变化不大,即便是周末的排水量与工作日相差也不大。这是由于农村常住居民人口数变化不大,且生活习惯稳定。此外,平原地区的生活污水中厕所污水的排水量占比最高,约为51%,丘陵地区次之,约为47%;山地地区的洗漱污水排水量占比最高,约为53%。

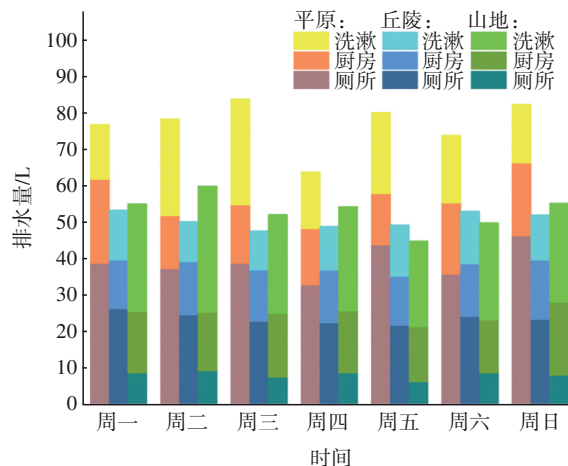


图3 不同地形农村农户人均排水量日变化情况

Fig.3 Daily variation of per capita water discharge in rural areas with different terrains

## 2.3 农村生活污水水质的季节变化

不同地形农村农户生活污水水质的季节变化情况表明,各污染物浓度波动情况基本呈现丘陵>山地>平原的规律。丘陵地区生活污水水质的季节波动较大,而平原与山地地区的相对稳定。这可能是由于按季节监测时只采集了各农户的化粪池出水,而丘陵地区农户的各类生活污水和养殖废水并未分开收集,其废水均直接排入化粪池,导致水质较差且季节波动较大。丘陵地区冬季污水浓度相对较高,COD、SS、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN和TP浓度的均值分别为1 083.2、150.9、272.9、371.8和33.8 mg/L,是秋季的4.86、1.76、2.82、2.38和1.14倍。山地农户的生活污水水质季节变化较小,冬季COD和SS浓度的均值分别为秋季的1.57和1.10倍,其他污染物浓度季节变化不大。平原地区生活污水水质最为稳定,COD与SS浓度只在夏季略有下降。不同地区生活污水水质的季节变化主要集中在冬春季节,寒假期间,农村返乡人员增多且生活水平较高,导致生活污水污染物浓度相对较高<sup>[9]</sup>。夏季和秋季为雨季,雨水可能进入排水管道,导致生活污水的污染



物浓度相对较低。另外,冬季温度较低,化粪池中微生物对污水的净化能力减弱,这也导致了冬季水质较差。各地区农户厕所污水的C/N值全年保持在1.1~3.6之间,且呈现春季高、夏秋季低的规律。

2.4 污水特征及影响因素分析

按季节采样的农村生活污水水质和按天采样的农村人均日排水量见表3。COD、SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN及TP的浓度变化幅度较大,变异系数分别为86.94%、117.33%、74.75%、74.04%、64.25%,均高于50%,表明污水水质指标可能与不同地区的农村特点有关,即因地点、季节、农户常住人口和收入水平等因素而存在较大差异。人均日排水量的变异系数为28.05%,表明该指标变化幅度不大。

表3 农户生活污水监测指标统计结果

Tab.3 Statistics results of domestic sewage monitoring indicators of the households

项 目	人均日排水量/L	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )
平均值	60.41	388.58	65.28	139.02	169.33	16.12
标准差	16.94	337.82	76.59	103.93	125.38	10.36
中位值	54.01	278.50	42.50	120.50	140.00	14.30
最小值	40.00	20.00	13.00	2.83	3.79	0.65
最大值	109.00	1 700.00	532.00	449.00	495.00	44.20

对原始数据分布形态进行Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验,人均日排水量、COD、SS及TP浓度均不符合正态分布。根据分布形态,对人均日排水量、COD、SS和TP浓度进行自然对数变换,变换后的数据符合正态分布( $P' > 0.05$ ),见表4。

表4 农户生活污水各监测指标对数转换后的K-S检验结果

Tab.4 K-S test results based on natural logarithmic transformation of domestic sewage monitoring indicators of the households

项 目	原始数据			对数变换后数据		
	偏度	峰度	P'	偏度	峰度	P'
人均日排水量	0.248	-0.158	0.011	0.194	-0.140	0.085
COD	0.226	-0.153	0.000	0.077	-0.096	0.194
SS	0.269	-0.255	0.000	0.105	-0.081	0.112
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.119	-0.102	0.060	—	—	—
TN	0.120	-0.100	0.058	—	—	—
TP	0.133	-0.068	0.023	0.055	-0.106	0.115

影响农村生活污水污染特征的主要因素包括地形、季节、农民收入水平和农户常住人口数等。

根据农村生活污水水质水量的变化规律,假设地形为影响水质水量的显著因素,以地形为随机因素,季节、农户收入水平和农户常住人口数为固定因素,通过一般线性模型对转换后符合正态分布的数据进行分析,结果见表5(水质样本数为126、水量样本数为42)。结合随机效应,各监测指标在地域上具有显著的统计学意义( $P < 0.05$ ),人均日排水量和各水质指标的主要影响因素为地形,这说明农村生活污水各监测指标存在变异的监测点位,同一地域内的农户由于所处环境、生活方式、生活用水量、自然属性相似,从而导致生活污水及各类污染物的含量具有一定的相似性<sup>[8]</sup>。结合固定效应,以显著性水平( $P < 0.05$ )为依据,人均日排水量的主要影响因素为地形、收入水平和农户常住人口数;COD、TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度的主要影响因素为地形、季节和收入水平,SS的主要影响因素为地形和收入水平。综上所述,湖南省农村生活污水各指标的主要影响因素为地形、季节和收入水平。

表5 农村生活污水特性影响因素的一般线性模型分析结果

Tab.5 Analysis results of influence factors of rural domestic sewage by using general linear model

项 目		显著性水平P值					
		人均日排水量	COD	SS	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	TP
随机因素	地形	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
	季节	—	0.000	0.059	0.003	0.000	0.000
固定因素	收入水平	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	农户常住人口数	0.000	0.542	0.058	0.057	0.034	0.687

由于采样时间和其他条件的限制,在研究农户生活污水季节排放特征时,未能完整调研农户不同类型生活污水的水量及水质,仅监测了农户厕所污水排放情况,因此现有水质数据仅能体现不同地形农村农户厕所污水水质的季节变化情况。

3 结论

厨房、洗漱和厕所污水的污染物浓度分别在06:00—10:00、14:00—18:00和18:00—22:00时段最高,农户排水量在18:00—22:00时段最大。周末平原与丘陵地区厨房污水的水质较差。农户厨房、洗漱和厕所生活污水混合后的COD、SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、

TN和TP浓度的加权中位值分别为663.6、106.0、58.2、95.1和10.3 mg/L, C/N值为7.0。农户人均日排水量为:平原(77 L)>山地(53 L)≈丘陵(50 L)。不同地形农村生活污水各污染物浓度季节波动情况呈现丘陵>山地>平原的规律。丘陵地区生活污水的水质季节性波动较大。影响湖南省农村生活污水水质水量的主要因素为地形、季节和收入水平。

### 参考文献:

- [1] 吴敬东, 杨胜天, 叶芝菡, 等. 小流域非点源污染模拟与生态修复影响评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 236-243.  
WU Jingdong, YANG Shengtian, YE Zhihan, *et al.* Non-point source pollution simulation and eco-remediation impact assessment in small watersheds [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 236-243(in Chinese).
- [2] 湖南省统计局. 湖南统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.  
Hunan Provincial Bureau of Statistics. Hunan Statistical Yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021(in Chinese).
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020年中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China Urban and Rural Construction Statistical Yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021(in Chinese).
- [4] 邹蓉. 湖南农村生活污水现状、问题与治理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013: 11-12.  
ZOU Rong. Research on Rural Sewage Present Situation, Problems and Governance in Hunan Province [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013: 11-12(in Chinese).
- [5] 王守中, 周振, 方小军, 等. 南方绿色小区生活污水水质水量特征分析[J]. 给水排水, 2020, 46(S1): 821-824, 829.  
WANG Shouzhong, ZHOU Zhen, FANG Xiaojun, *et al.* Characteristics analysis of domestic wastewater quality and quantity in southern green community [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(S1): 821-824, 829(in Chinese).
- [6] 王文林, 胡孟春, 唐晓燕. 太湖流域农村生活污水产排污系数测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 616-621.  
WANG Wenlin, HU Mengchun, TANG Xiaoyan. Estimation of sewage production and discharge coefficients of rural areas in Taihu Lake Basin [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(6): 616-621(in Chinese).
- [7] 刘中, 金树权, 罗艳. 宁波地区农村生活污水产污特征分析研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(10): 1127-1130.  
LIU Zhong, JIN Shuquan, LUO Yan. Pollution characterization study of rural domestic sewage in Ningbo area [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(10): 1127-1130(in Chinese).
- [8] 江科, 王业春, 张晟, 等. 三峡库区小流域农村生活污水排放格局及污染物特征[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6): 39-43, 57.  
JIANG Ke, WANG Yechun, ZHANG Sheng, *et al.* Emission pattern and characteristics of rural domestic sewage in the small watershed of the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(6): 39-43, 57(in Chinese).
- [9] 何源, 吕锡武, 郑向群, 等. 巢湖地区农村生活污水产排污调研方法及实证[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 38(2): 319-325.  
HE Yuan, LÜ Xiwu, ZHENG Xiangqun, *et al.* Investigation and demonstration of rural domestic sewage generation and discharge in the Chaohu area, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 38(2): 319-325 (in Chinese).
- [10] 韦琦, 罗方周, 徐相龙, 等. A<sup>2</sup>/O工艺处理低温低碳氮比生活污水的脱氮效率及反应动力学[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1367-1376.  
WEI Qi, LUO Fangzhou, XU Xianglong, *et al.* Nitrogen removal efficiency and kinetics of A<sup>2</sup>/O process treating low temperature and low C/N ratio municipal wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(4): 1367-1376(in Chinese).

作者简介: 张文强(1998-), 男, 山西大同人, 硕士, 主要研究方向为环境污染修复技术。

E-mail: wenqiang1232021@163.com

收稿日期: 2022-04-09

修回日期: 2022-06-20

(编辑: 任莹莹)