

\*\*\*\*\*  
试验研究  
\*\*\*\*\*

# 农村生活污水利用中水力负荷对污染物分布和草地净化效率的影响

苏闯建<sup>1</sup>, 王大扬<sup>1</sup>, 舒焱<sup>1</sup>, 于振江<sup>1</sup>, 陈志华<sup>2</sup>, 潘振东<sup>2</sup>, 林彰文<sup>1</sup>

(1.广东省环境科学研究院, 广东 广州 510000; 2.广州市增城排水有限公司, 广东 广州 511300)

**摘要:** [目的] 探究草地消纳利用农村生活污水过程中污染物分布规律, 为农村生活污水资源化利用的风险防控提供科学参考。[方法] 考察草地消纳利用农村生活污水过程中水力负荷对土壤溶液和土壤污染物分布的影响, 分析不同深度土壤溶液和土壤污染物变化规律, 并进一步通过 Pearson 相关系数探讨水力负荷与土壤溶液和土壤污染物之间的关联性 & 影响程度。[结果] ①随着水力负荷由  $0.005 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  逐渐增加至  $0.05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 草地中出现  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  富集现象, 而且  $\text{NO}_3^--\text{N}$  反硝化性能不佳是制约草地脱氮速率的限速步骤。②水力负荷与土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量之间具有良好的正相关性, 相关性系数高达 0.94。[结论] 草地消纳利用农村生活污水过程中应合理分配水力负荷, 做好环境风险管控。

**关键词:** 农村生活污水; 资源化利用; 水力负荷; 污染物分布

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0001-09

中图分类号: X52, X799.3

**文献参数:** 苏闯建, 王大扬, 舒焱, 等. 农村生活污水利用中水力负荷对污染物分布和草地净化效率的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 1-9. Su Chuangjian, Wang Dayang, Shu Yan, et al. Effects of hydraulic load on pollutant distribution and grassland purification efficiency in rural domestic sewage utilization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 1-9. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.001; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.001.

## Effects of hydraulic load on pollutant distribution and grassland purification efficiency in rural domestic sewage utilization

Su Chuangjian<sup>1</sup>, Wang Dayang<sup>1</sup>, Shu Yan<sup>1</sup>, Yu Zhenjiang<sup>1</sup>, Chen Zhihua<sup>2</sup>, Pan Zhendong<sup>2</sup>, Lin Zhangwen<sup>1</sup>

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou, Guangdong

510000, China; 2. Guangzhou Zengcheng Drainage Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511300, China)

**Abstract:** [Objective] The pollutants distribution during grassland digestion and utilization of rural domestic sewage was explored in order to provide a scientific reference for risk prevention and control in the resource utilization of rural domestic sewage. [Methods] This study investigated the effects of hydraulic load on soil solution and soil pollutant distribution during the grassland digestion and utilization of rural domestic sewage. It also analyzed the variations in soil solution and soil pollutants at different depths and explored the correlation among hydraulic load, soil solution, and soil pollutants using the Pearson correlation coefficient. [Results] ① As the hydraulic load increased gradually from  $0.005 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  to  $0.05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , an accumulation of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  was observed in the grassland. The poor denitrification performance of  $\text{NO}_3^--\text{N}$  was identified as the limiting step restricting the denitrification rate of the grassland. ② The hydraulic load showed a strong positive correlation with the  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  content in the soil, with a correlation coefficient of 0.94. [Conclusion] During the grassland digestion and utilization of rural domestic sewage, it is necessary to distribute the hydraulic load rationally and control the environmental risks.

**Keywords:** rural domestic sewage; resource utilization; hydraulic load; pollutant distribution

收稿日期: 2024-08-12

修回日期: 2024-11-24

采用日期: 2024-11-25

资助项目: 广州市水务局科技项目“广州市农村生活污水处理设施精细化管理模式研究”(穗污管办合字[2023]38号); 广东省生态环境厅、广东省农村生活污水治理高质量发展技术支撑项目(XMHT-2024-NC-KY069)

第一作者: 苏闯建(1989—), 男(汉族), 河南省商丘市人, 博士研究生, 工程师, 主要从事农业农村水污染治理技术方面的研究。Email: cjsu2015@163.com。

通信作者: 林彰文(1976—), 男(汉族), 湖南省邵阳市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事农业农村水污染防治方面的研究。Email: jndx-linzw@163.com。

农村生活污水无序排放会造成农村水环境污染,威胁农村居民居住环境和日常饮用水安全<sup>[1-3]</sup>。因此,农村生活污水治理作为农村人居环境改善的主要任务和实现乡村振兴的重要举措<sup>[4-6]</sup>,对于改善农村水环境,建设美丽乡村具有重要意义。目前,农村生活污水常采用的治理模式主要有 3 种,分别为纳入城镇污水处理厂、建设污水处理设施和资源化利用<sup>[7-12]</sup>。资源化利用模式主要用于常住人口较少或人口居住分散村庄,该模式不仅实现农村生活污水治理,还可以利用污水中氮磷资源促进农业发展,是实现上述类型村庄生活污水持续治理的有效策略<sup>[13-16]</sup>。然而,农村生活污水资源化利用过程中,生活污水通过均匀布水,持续对土壤—作物受体进行灌溉,而受体完全去除污染物耗时较长,会出现污染物累积的潜在环境风险。因此,如何科学合理匹配农村生活污水水力负荷和受体面积,实现生活污水治理的同时有效管控受体潜在风险,是进一步推动农村生活污水资源化利用的关键。

农村生活污水资源化利用过程中,通过受纳体的土壤、植被、微生物等的物理、生物作用,通过截留、吸附、过滤、沉淀和作物利用等方式<sup>[17-19]</sup>能够一定程度去除利用污染物,但仍会有污染物持续进入土壤—作物受体,给土壤、水体、作物、微生物甚至地下水带来一定的影响<sup>[20-23]</sup>。因此,农村生活污水资源化利用过程中潜在风险的识别、评价与控制策略等领域的研究受到广泛的关注。在农村生活污水对作物影响方面,李欣<sup>[24]</sup>研究表明,农村污水灌溉对蔬菜品质指标未出现显著性差异。王云龙等<sup>[25]</sup>研究表明,生活污水灌溉未对蔬菜生长及品质产生显著负面影响。关于农村生活污水对土壤的影响,杨茜<sup>[26]</sup>研究表明,经过厌氧处理的生活污水对土壤理化性质和微生物群落有一定的影响。蒯伟等<sup>[27]</sup>研究发现生活污水的处理利用不当,会影响土壤的理化性质和微生物群落结构。当前关于农村生活污水资源化利用的研究主要集中在资源化利用对作物、土壤及其微生物的影响,而对于土壤—作物受体中土壤溶液及土壤中污染物变化规律,以及水力负荷与污染变化的内在关联及影响程度还缺乏系统探究。因此,以农村广泛存在的草地为受体,探讨土壤溶液及土壤中污染物分布随水力负荷变化规律,阐明水力负荷对草地消纳利用农村生活污水效能的影响及关联性,对于评估农村生活污水资源化利用的潜在风险并针对性提出管控策略,从而进一步推进农村生活污水的资源化利用具有重要意义。基于此,本研究以草地受体为研究对象,通过室外资源化利用试验,探讨农村生活污水在草地

消纳利用过程中,水力负荷变化对不同深度的土壤溶液及土壤中污染物分布的影响,分析土壤溶液及土壤污染物的变化规律,并进一步通过 Pearson 相关系数考察水力负荷变化与土壤溶液和土壤中污染物之间的关联性及其影响程度,旨在明晰不同水力负荷作用下草地消纳利用农村生活污水过程污染物富集情况及关联性,进而为草地消纳利用农村生活污水的风险管控提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

以广州市增城区正果镇麻冚村民委员会排赖排老排新社自然村的草地为试验区,其位于广州市的东北部区域(北纬 23.45', 东经 113.90'),该村生活污水治理模式为资源化利用,污水经三格厌氧池预处理后在附近草地消纳利用。

### 1.2 试验设计与样品测试方法

本研究的室外试验场地是在生活污水资源化利用现有条件的基础上进行改造的,搭建的草地受体室外试验区域、完善的布水措施及采样点位设置如图 1 所示。①在草地搭建一个 8 m×10 m 的试验用高透光性遮雨大棚,作为生活污水资源化利用的试验区。②在试验区域划分 4 个子试验区域,分别标记为 S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, 子试验区域有效面积约 6 m<sup>2</sup> (2 m×3 m), 每个子试验区相隔 1 m, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> 这 3 个区域对应水力负荷分别为 Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, 依次为 0.005, 0.01 和 0.05 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)。S<sub>0</sub> 为空白对照区域,定期使用自来水浇灌,保持该区域草地正常生长。③采用一主三支均匀布水方式将厌氧处理后生活污水通过供水泵输送到子区域进行消纳利用。通过阀门和流量计进行流量控制,供水末端分别采用滴灌带进行均匀布水。④使用定时开关对水泵进行启停控制,考虑到早中晚是排水高峰期,分 3 个时间段从厌氧池最后一格抽水对草地受体进行供水。

采集的各土壤溶液样品过 0.45 μm 滤膜后进行水质指标测试。土壤溶液测定指标为化学需氧量(COD)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、总氮(TN)、总磷(TP)浓度,对应的检测方法分别为重铬酸盐法(HJ 828—2017)、纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)、离子色谱法(HJ 84—2016)、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)、钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—1989)。土壤样品检测项目为有机质含量, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, TN, TP 含量, 采用的检测方法依次为重铬酸钾—硫酸溶液氧化法(NY/T 1121.6—2006)、氯化钡溶液提取—分光光度

法(HJ 634—2012)、氯化钾溶液提取—分光光度法(HJ 634—2012)、凯氏定氮法(LY/T 1228—2015)、碱熔—钼锑抗分光光度法(HJ 632—2011)。对于上述

4 个子试验区域,每个深度采集 2 个点位的样品,取平均值用于后续的分析。草地消纳利用的原水(污水)为厌氧池预处理后农村生活污水,具体水质情况详见表 1。

图例 ○ 土壤取样点 □ 土壤溶液取样点

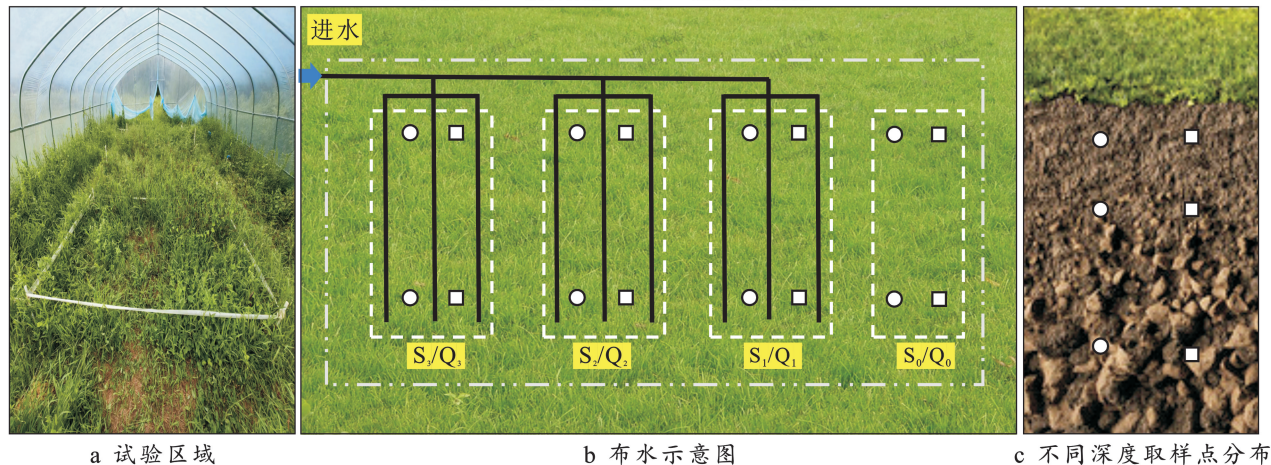


图 1 室外试验及采样点分布示意图

注:Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub> 依次为 S<sub>1</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>3</sub> 试验子区域对应的水力负荷,其值分别为 0.005, 0.01 和 0.05 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)。S<sub>0</sub>, Q<sub>0</sub> 为空白对照。下同。

图 1 室外试验及采样点分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of outdoor test and distribution of sample collection points

表 1 厌氧池出水水质情况

Table 1 Pollutant concentration of anaerobic pond effluent

测试指标	化学需氧量	氨氮	硝酸盐	总氮	总磷
污染物含量	24.3	18.3	0.02	20.4	1.04

此外,对于试验区域草地生长草种类和密度通过统计选取的 2 个 1 m×1 m 试验区域内草的种类和数量获取,试验草地基本情况详见表 2。

表 2 试验草地基本情况

Table 2 Basic condition of grassland

草种类	马唐	臭鸡矢藤	地桃花
密度/(株·m <sup>-2</sup> )	64	16	2

草地试验区域的土壤类型为砂壤土。草地上层、中层和下层原土土壤污染物含量的背景值详见表 3。

表 3 不同深度的草地受体土壤背景值

Table 3 Soil background values of grassland at different depths

土层深度	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	氨氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	总磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	总氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	硝酸盐氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )
5—20 cm(上层)	11.8	1.2	292.1	819.9	1.2
40—60 cm(中层)	4.9	0.4	191.8	383.7	0.8
90—120 cm(下层)	4.7	0.4	200.4	286.9	0.4

## 2 结果与分析

### 2.1 草地消纳利用去除污染物的效果

为了探讨草地消纳利用农村生活污水去除污染物

### 1.3 采样方法与样品采集

本试验开始时间为 2023 年 9 月 21 日,连续灌溉 60 d 后采集土壤溶液和土壤样品。土壤溶液采用冯永霞等<sup>[28]</sup>报道的负压法进行采集。具体方法为:通过钻孔的方式将陶瓷头埋设到预定位置,深度为 20 cm(上层),60 cm(中层),120 cm(下层),随后上层、中层和下层土壤回填做好密封,并将陶瓷头与取样瓶连接,通过负压发生装置抽真空,使整个取样系统处于负压状态,将土壤间隙水(土壤溶液)吸入取样瓶。土壤样品通过麻花取土钻进行采集,采集上层(5—20 cm)、中层(40—60 cm)、下层(90—120 cm)土壤样品。对于草地受体连续分散布水消纳利用 60 d 后,按上述要求采集土壤和土壤溶液样品。对于上述 4 个子试验区域,每个深度分别从其上半区域和下半区域各采集 1 个样品(图 1),共计 48 个样品。

的性能,本研究首先考察了水力负荷变化对下层土壤溶液污染物浓度的影响。如表 4 和图 2 所示,厌氧池预处理后的污水通过草地消纳利用后,下层土壤溶液污染物浓度均下降,特别是 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN, TP 浓度相

比于厌氧池处理后污水的明显下降,这说明草地消纳利用厌氧池预处理后的农村生活污水有利于进一步去除污水中的污染物。由下层土壤溶液污染物去除率随水力负荷变化可知,随着水力负荷增大,土壤溶液 COD 去除率逐渐提高,而 TN 去除率逐渐下降,但水力负荷变化对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 去除率影响较小。此外,还可以发现,随着水力负荷由  $0.005 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  逐渐增加至  $0.05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,下层土壤溶液中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度逐渐升高,这说明厌氧池预处理后生活污水流过草地上层区域,中层区域过程中发生了污染物之间的转化。因此,为了系统探究草地消纳利用厌氧池预处理

后农村生活污水的成效,本研究系统考察草地消纳利用农村生活污水过程中,水力负荷变化对上层、中层和下层土壤和土壤溶液中污染物浓度变化的影响。

表 4 草地下层土壤溶液污染物浓度

Table 4 Pollutant concentration of grassland subsoil

项目	污染物浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )				
	化学需氧量	氨氮	硝酸盐	总氮	总磷
厌氧池出水	24.3	18.3	0.02	20.4	1.04
$Q_1$ 负荷	15.8	0.2	0.50	1.1	0.02
$Q_2$ 负荷	13.8	0.7	2.20	3.3	0.05
$Q_3$ 负荷	8.3	0.6	6.30	7.5	0.02

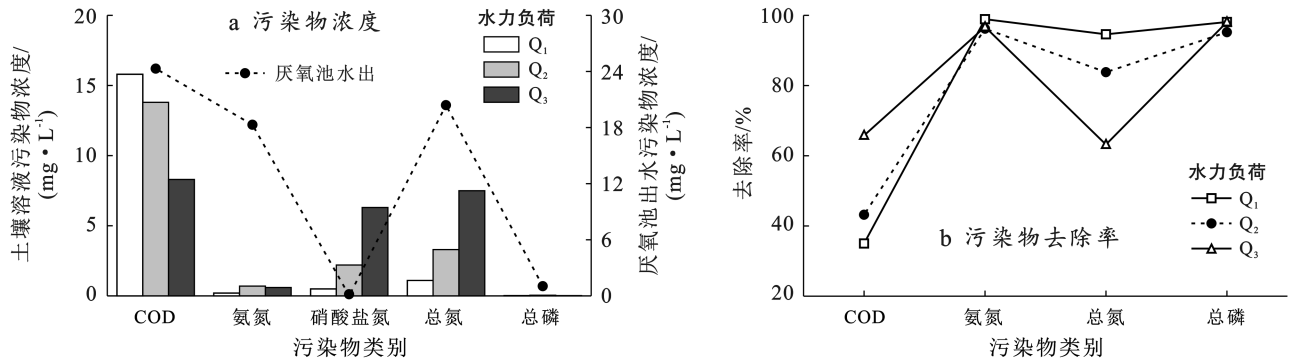


图 2 水力负荷对下层土壤溶液污染物浓度及去除率的影响

Fig.2 Effects of hydraulic load on concentration and removal rate of pollutants in subsoil solution

## 2.2 草地中有机物随水力负荷变化规律

农村生活污水经布液管进入草地接纳体后土壤溶液化学需氧量(COD)和有机物浓度分布情况如图 3 所示。由图 3 可知,随着水力负荷的增大,上层和 中层土壤溶液 COD 浓度均呈现先升高后降低的趋势,但是对于下层土壤溶液而言,COD 浓度随着水力负荷的增加整体呈现下降的趋势。相较于  $Q_1$  和  $Q_2$ ,

$Q_3$  负荷下 3 个深度土壤溶液 COD 均最低。为了探究影响 COD 浓度变化的因素,本研究进一步探讨不同水力负荷下 3 个深度土壤有机质含量的变化规律,对于上层土壤而言,有机质含量随着水力负荷增加逐渐降低,而中层和深层土壤有机质含量呈现相反的趋势,但是总体而言,水力负荷的增加,土壤中有机质并未呈现富集的现象。

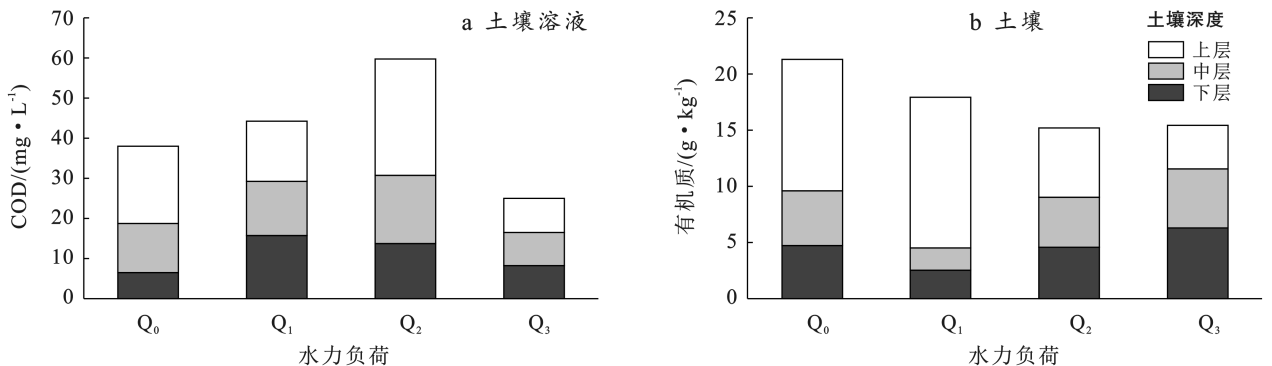


图 3 水力负荷对土壤溶液 COD 和土壤有机质的影响

Fig.3 Effects of hydraulic load on soil solution COD and soil organic matter

## 2.3 草地中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 随水力负荷变化规律

随着水力负荷的变化,草地接纳体土壤溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度变化规律如图 4 所示。对于上层土壤溶

液,水力负荷增加,导致土壤溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度升高,而中层和下层土壤溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度随着水力负荷的增加而呈现先升高后降低的变化趋势,但整体而

言,水力负荷增加导致土壤溶液  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除性能不佳。结合不同水力负荷下土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量的变化情况。此外随着水力负荷的增加,上层和上层土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量先降低后升高,而下层土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量逐渐升高,整体而言土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量随着水力负

荷增加有富集的趋势。草地接纳体对土壤溶液  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除主要通过吸附截留、微生物硝化反硝化作用以及草地植被的吸收利用。而随着水力负荷的增大,土壤溶液和土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  都整体呈现增加的趋势。

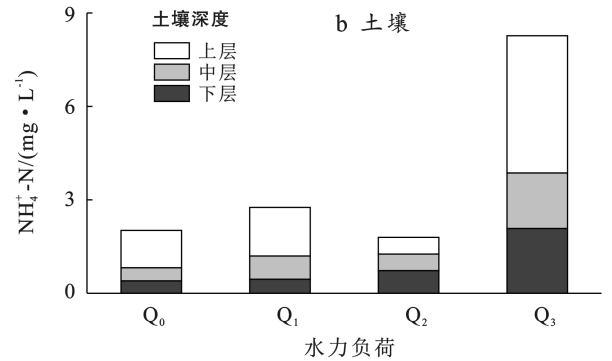
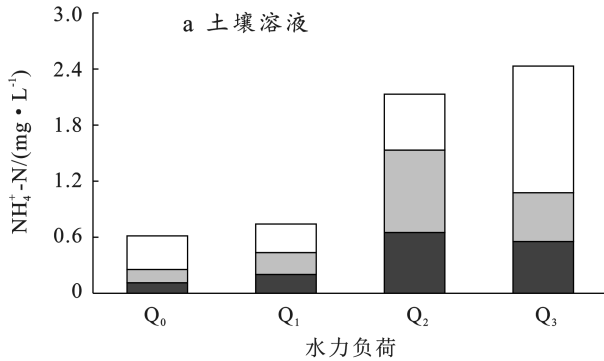


图 4 水力负荷对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量的影响

Fig.4 Effect of hydraulic load on  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  content

## 2.4 草地中 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 随水力负荷变化规律

不同水力负荷作用下草地接纳体土壤溶液  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度变化规律如图 5 所示。

由图 5 可知,对于上层和下层土壤溶液,增大水力负荷不利于  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的去除,但中层土壤溶液

$\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度随着水力负荷的增加而呈现先升高后降低的趋势。然而,土壤  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的含量与土壤溶液  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的变化呈现相反的规律,可以发现,随着水力负荷增加,上层土壤  $\text{NO}_3^--\text{N}$  降低,而下层土壤呈现先降低后升高的变化规律。

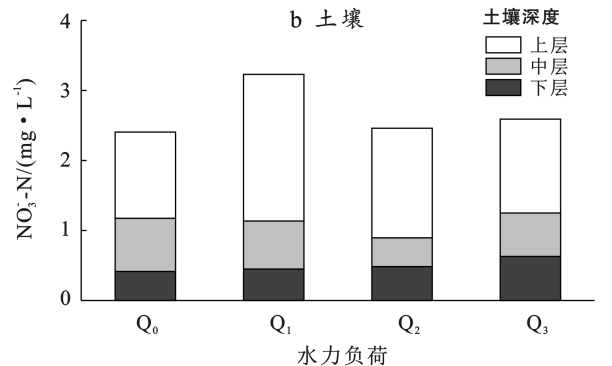
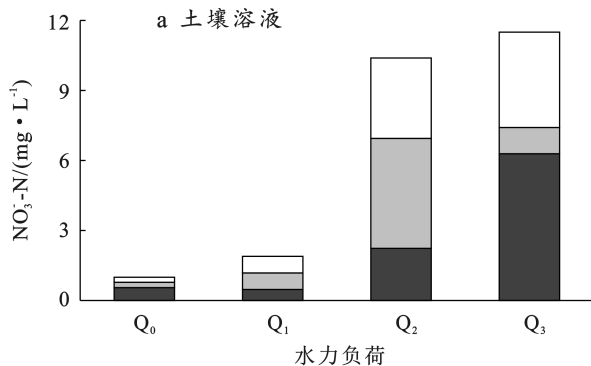


图 5 水力负荷对  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量的影响

Fig.5 Effect of hydraulic load on  $\text{NO}_3^--\text{N}$  content

## 2.5 草地中 TN 随水力负荷变化规律

水力负荷变化对草地接纳体土壤溶液 TN 的影响如图 6 所示。由图 6 可以发现,随着水力负荷的增加,上层和下层土壤溶液 TN 浓度呈现逐渐升高的趋势,而中层土壤溶液 TN 浓度呈现先升后降的变化趋势。然而,土壤 TN 的含量变化与土壤溶液的相反,水力负荷的增加使各层土壤中的 TN 含量整体呈现降低的现象。

为了进一步探究影响土壤溶液 TN 浓度变化的影响因素,对各层土壤溶液  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 浓度的变化情况进行分析,具体情况如图 7 所示。由图 7 可知,整体而言,水力负荷的增加,不利于草地受

纳体脱氮。特别是上层和下层土壤溶液,随着水力负荷的增加,其  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 浓度均呈现逐渐升高的趋势;此外, $\text{NO}_3^--\text{N}$  占 TN 的比例也随着水力负荷的增加而升高。

## 2.6 草地中 TP 随水力负荷变化规律

如图 8 所示,水力负荷变化对各层土壤溶液 TP 的浓度影响较大。随着水力负荷的增大,各层土壤溶液 TP 浓度呈现先升高后下降的趋势,显然,  $Q_2$  负荷下草地接纳体土壤各层土壤溶液 TP 浓度最高,说明该条件下 TP 的削减性能最差。相较而言,各层土壤 TP 含量随水力负荷的变化不大,但  $Q_2$  和  $Q_3$  水力负

荷下土壤 TP 含量仍低于  $Q_1$  水力负荷下的。出现这种现象的原因可能是高水力负荷有利于草地植被的

生长,这加快了其对土壤中磷营养盐的吸收,但不利于对土壤溶液 TP 的拦截吸附。

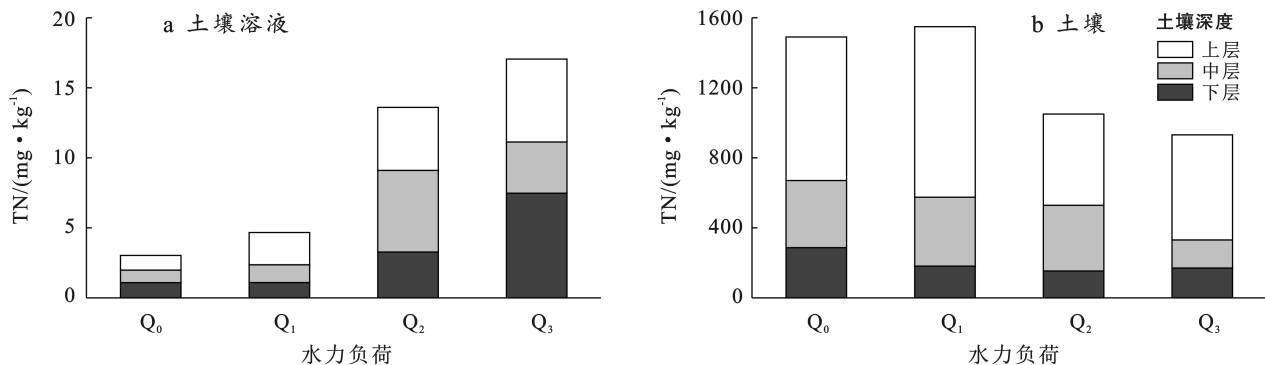


图 6 水力负荷对 TN 含量的影响

Fig.6 Effect of hydraulic load on TN content

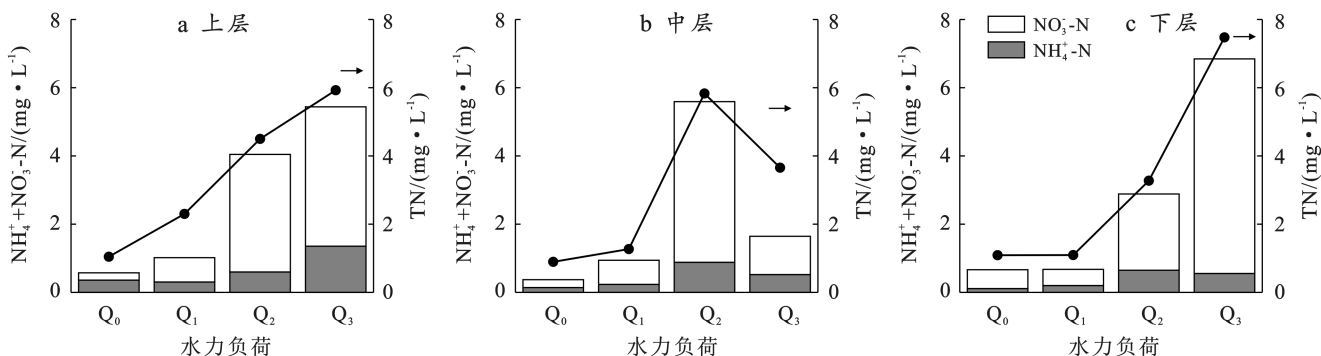


图 7 各层土壤溶液中  $NH_4^+-N$ ,  $NO_3^--N$  和 TN 的浓度变化

Fig.7 Concentrations changes of  $NH_4^+-N$ ,  $NO_3^--N$  and TN in soil solutions at different layer

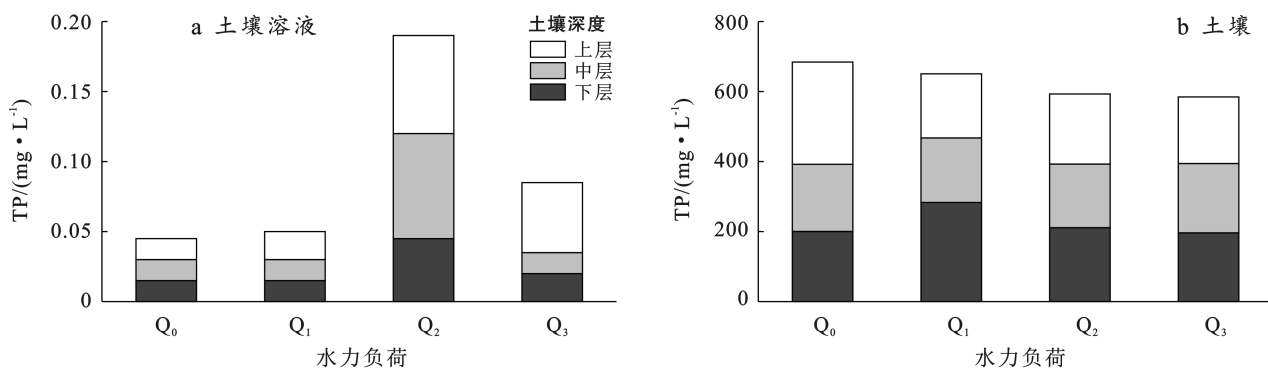


图 8 水力负荷对 TP 含量的影响

Fig.8 Effect of hydraulic load on TP content

## 2.7 水力负荷与草地中污染物分布之间的关联性

由试验结果可知,水力负荷显著影响草地接纳体土壤溶液和土壤污染物分布,因此,为了进一步探究厌氧池预处理后的农村生活污水在草地接纳体消纳利用过程中各污染物含量变化与水力负荷的关系及影响程度,本研究通过 Pearson 相关系数系统分析各层土壤溶液和土壤污染物变化与水力负荷之间的关联性。上层土壤溶液和土壤污染物与水力负荷之间的相关性如图 9 所示,显然,水力负荷与土壤溶液

$NH_4^+-N$  浓度、土壤  $NH_4^+-N$  含量、土壤溶液 TN 浓度以及土壤溶液  $NO_3^--N$  浓度之间具有良好的正相关性,相关性系数依次为 0.99,0.94,0.86,0.72。相反,水力负荷与土壤  $NO_3^--N$  含量(-0.80)、土壤有机质含量(-0.76)、土壤溶液 COD 浓度(-0.67)之间具有很好的负相关性。分析水力负荷与中层土壤溶液和土壤污染物之间的关联性,可以发现,水力负荷与土壤  $NH_4^+-N$  (0.97)、土壤 TP (0.96)、土壤有机质 (0.76) 具有良好的正相关性,相反,土壤 TN 以及土

壤溶液 COD 与水力负荷具有负相关性。由水力负荷与下层土壤溶液和土壤污染物关联性可知,土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  (1.00)、土壤  $\text{NO}_3^--\text{N}$  (1.00)、土壤溶液  $\text{NO}_3^--\text{N}$  (0.98)、土壤溶液 TN (0.97)、土壤有机质 (0.89) 与水力负荷之间展现出良好的正相关性,而水力负荷与土壤溶液 COD、土壤 TP 之间具有负相关性。

a 上层土壤溶液及土壤

$x_1$	1.0	-0.67	0.99	0.72	0.86	0.21	-0.76	0.94	-0.80	-0.44	0.0019
$x_2$	-0.67	1.0	-0.54	0.029	-0.19	0.58	0.024	-0.89	0.086	-0.36	0.74
$x_3$	0.99	-0.54	1.0	0.83	0.93	0.38	-0.86	0.86	-0.89	-0.59	0.17
$x_4$	0.72	0.029	0.83	1.0	0.98	0.83	-1.00	0.43	-0.99	-0.94	0.69
$x_5$	0.86	-0.19	0.93	0.98	1.0	0.69	-0.99	0.62	-0.99	-0.84	0.52
$x_6$	0.21	0.58	0.38	0.83	0.69	1.0	-0.80	-0.14	-0.76	-0.97	0.98
$x_7$	-0.76	0.024	-0.86	-1.00	-0.99	-0.80	1.0	-0.48	1.00	0.92	-0.66
$x_8$	0.94	-0.89	0.86	0.43	0.62	-0.14	-0.48	1.0	-0.53	-0.10	-0.35
$x_9$	-0.80	0.086	-0.89	-0.99	-0.99	-0.76	1.00	-0.53	1.0	0.90	-0.61
$x_{10}$	-0.44	-0.36	-0.59	-0.94	-0.84	-0.97	0.92	-0.10	0.90	1.0	-0.90
$x_{11}$	0.0019	0.74	0.17	0.69	0.52	0.98	-0.66	-0.35	-0.61	-0.90	1.0

b 中层土壤溶液及土壤

$x_1$	1.0	-0.87	0.038	-0.32	0.13	-0.41	0.76	0.97	0.19	-1.00	0.96
$x_2$	-0.87	1.0	0.45	0.74	0.37	0.80	-0.35	-0.97	-0.65	0.89	-0.97
$x_3$	0.038	0.45	1.0	0.93	1.00	0.90	0.68	-0.22	-0.97	0.0055	-0.23
$x_4$	-0.32	0.74	0.93	1.0	0.90	1.00	0.37	-0.56	-0.99	0.35	-0.56
$x_5$	0.13	0.37	1.00	0.90	1.0	0.85	0.74	-0.13	-0.95	0.096	-0.14
$x_6$	-0.41	0.80	0.90	1.00	0.85	1.0	0.28	-0.63	-0.97	0.44	-0.64
$x_7$	0.76	-0.35	0.68	0.37	0.74	0.28	1.0	0.57	-0.49	-0.74	0.56
$x_8$	0.97	-0.97	-0.22	-0.56	-0.13	-0.63	0.57	1.0	0.44	-0.97	1.00
$x_9$	0.19	-0.65	-0.97	-0.99	-0.95	-0.97	-0.49	0.44	1.0	-0.22	0.44
$x_{10}$	-1.00	0.89	-0.0055	0.35	-0.096	0.44	-0.74	-0.97	-0.22	1.0	-0.97
$x_{11}$	0.96	-0.97	-0.23	-0.56	-0.14	-0.64	0.56	1.00	0.44	-0.97	1.0

c 下层土壤溶液及土壤

$x_1$	1.0	-0.99	0.41	0.98	0.97	-0.26	0.89	1.00	1.00	0.018	-0.71
$x_2$	-0.99	1.0	-0.55	-1.00	-1.00	0.11	-0.95	-0.99	-1.00	0.14	0.81
$x_3$	0.41	-0.55	1.0	0.58	0.61	0.77	0.78	0.46	0.48	-0.91	-0.93
$x_4$	0.98	-1.00	0.58	1.0	1.00	-0.068	0.96	0.99	0.99	-0.18	-0.83
$x_5$	0.97	-1.00	0.61	1.00	1.0	-0.025	0.97	0.98	0.99	-0.22	-0.85
$x_6$	-0.26	0.11	0.77	-0.068	-0.025	1.0	0.21	-0.21	-0.18	-0.97	-0.50
$x_7$	0.89	-0.95	0.78	0.96	0.97	0.21	1.0	0.91	0.92	-0.44	-0.95
$x_8$	1.00	-0.99	0.46	0.99	0.98	-0.21	0.91	1.0	1.00	-0.040	-0.75
$x_9$	1.00	-1.00	0.48	0.99	0.99	-0.18	0.92	1.00	1.0	-0.064	-0.76
$x_{10}$	0.018	0.14	-0.91	-0.18	-0.22	-0.97	-0.44	-0.040	-0.064	1.0	0.70
$x_{11}$	-0.71	0.81	-0.93	-0.83	-0.85	-0.50	-0.95	-0.75	-0.76	0.70	1.0

注: $x_1$ — $x_{11}$ 分别代表水力负荷、溶液 COD、溶液氨氮、溶液硝酸氮、溶液 TN、溶液 TP、土壤有机质、土壤氨氮、土壤硝酸氮、土壤 TN 和土壤 TP。

图 9 水力负荷与土壤溶液及土壤污染物变化的关联性  
Fig.9 Relationship of hydraulic load and pollutants changes between soil solution and soil

### 3 讨论

#### 3.1 水力负荷对草地中污染物的分布影响

污水进入草地接纳体,土壤溶液 COD 的去除主要利用草地—微生物这一天然的净化利用系统,经过截留、吸附、草地植物吸收利用和微生物降解等作用,而出现上述试验结果的原因可以归结为水力负荷的增加,加快了土壤有机质的供应,有利于提高土壤肥力,促进草地植被生长,提高草地植被对有机质的利用速率,从而适当提高水力负荷能够强化对土壤溶液 COD 的去除,避免 COD 的富集风险。对于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,适当的增加水力负荷,有利于通过促进草地植被的生长,加快植物对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的吸收利用,从而强化对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除能力。然而水力负荷过大,一方面不利于接纳体对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的截留吸附,另一方面会抑制接纳体的复氧能力,减缓微生物的硝化速率,进而导致  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除性能不佳,出现  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  富集的现象。与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除过程类似, $\text{NO}_3^--\text{N}$  的去除主要通过吸附、微生物厌氧反硝化和植物吸收利用。水力负荷增加,虽然加快了草地植被对土壤  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的吸收利用,并通过降低草地接纳体的复氧能力一定程度地改善厌氧反硝化菌的活性,但也同时大大削弱了草地接纳体对  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的吸附拦截能力,并且水力负荷增加也意味着单位时间要处理的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  负荷增加,从而导致去除土壤溶液  $\text{NO}_3^--\text{N}$  性能较差,出现  $\text{NO}_3^--\text{N}$  富集的风险。此外,随着水力负荷的增加,其  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 浓度均呈现逐渐升高的趋势,并且, $\text{NO}_3^--\text{N}$  占 TN 的比例也随着水力负荷的增加而升高,这意味着微生物对  $\text{NO}_3^--\text{N}$  反硝化性能可能是制约整个草地接纳体脱氮速率的限速步骤。最后,水力负荷有利于草地植被的生长,这加快了其对土壤中磷营养盐的吸收,但不利于对土壤溶液 TP 的拦截吸附。

#### 3.2 水力负荷对草地中污染物富集的影响

综上,水力负荷增加,抑制上层土壤溶液  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除性能,导致草地接纳体上层出现  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  富集的风险,同时也不利于中层土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TP 和有机质的消纳利用。此外,下层土壤溶液  $\text{NO}_3^--\text{N}$  以及下层土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、土壤有机质的去除也会受到抑制。因此,水力负荷增大,可能出现草地接纳体  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  富集的风险。

结合试验结果和讨论可知,以草地为接纳体,消纳利用厌氧池预处理后的农村生活污水,能够通过污水中的氮、磷等营养元素的利用和去除,达到污水进一步净化的效果;然而,由于水力负荷由

0.005 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)逐渐增加至 0.05 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),草地利用和去除污水中的氮等营养元素的性能受到抑制,可能出现草地土壤溶液和土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 富集的风险。因此,草地消纳利用农村生活污水作为农村生活污水治理的方式之一,要充分考虑草地的用水用肥需求,科学确定资源化利用用水量,避免对土壤及周边地表水体和地下水造成污染。

## 4 结论

(1) 随着水力负荷由 0.005 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)逐渐增加至 0.05 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),草地接纳体出现 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 富集的风险,特别是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 反硝化去除性能不佳是制约草地接纳体脱氮速率的限速步骤。

(2) 水力负荷与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量正相关性系数高达 0.94,水力负荷的增加可能导致草地接纳体 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 污染的风险。

(3) 资源化利用是推进农村生活污水治理的有效路径,但消纳利用过程的风险识别与管控策略还有待进一步探讨,本研究仅是一次草地消纳利用的探索,要建立完善的农村生活污水安全资源化利用治理体系还需要更加深入系统地研究。

## 参考文献(References)

- [1] Lu Meiyun, Yang Shanshan, Yu Xinlei, et al. Decision support framework adapted to local conditions to select technologies for rural domestic sewage treatment in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,426:139067.
- [2] Yan Yuan, Chen Yongzhi, Wu Xinbo, et al. Enhanced nitrogen removal from rural domestic sewage via partial nitrification-anammox in integrated vertical subsurface flow constructed wetland [J]. *Environmental Research*, 2023,233:116338.
- [3] Feng Bingbing, Chen Juan, Wang Chao, et al. Ofloxacin weakened treatment performance of rural domestic sewage in an aerobic biofilm system by affecting biofilm resistance, bacterial community, and functional genes [J]. *Environmental Research*, 2024,246:118036.
- [4] 谢林花,吴德礼,张亚雷.中国农村生活污水处理技术现状分析及评价[J].*生态与农村环境学报*,2018,34(10):865-870.  
Xie Linhua, Wu Deli, Zhang Yalei. Analysis and evaluation of China's rural domestic sewage treatment technology [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018,34(10):865-870.
- [5] 陈娟,王超,王沛芳,等.基于人口分散度的农村生活污水处理模式选择[J].*中国给水排水*,2020,36(23):81-88.

- Chen Juan, Wang Chao, Wang Peifang, et al. Choice of rural domestic sewage treatment mode based on dispersion degree of rural resident [J]. *China Water & Wastewater*, 2020,36(23):81-88.
- [6] 高松,何伟,徐微,等.反硝化除磷工艺处理农村生活污水的工程实践[J].*中国给水排水*,2023,39(14):114-119.  
Gao Song, He Wei, Xu Wei, et al. Demonstration for application of denitrifying phosphorus removal process in rural domestic sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2023,39(14):114-119.
- [7] Chen Peizhen, Zhao Wenjie, Chen Dongkai, et al. Research progress on integrated treatment technologies of rural domestic sewage: A review [J]. *Water*, 2022,14(15):2439.
- [8] Brzusek A, Widomski M K, Musz-Pomorska A. Socio-economic aspects of centralized wastewater system for rural settlement under conditions of Eastern Poland [J]. *Water*, 2022,14(10):1667.
- [9] Wu Haiming, Zhang Jian, Li Cong, et al. Mass balance study on phosphorus removal in constructed wetland microcosms treating polluted river water [J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2013,41(9):844-850.
- [10] Boog J, Kalbacher T, Nivala J, et al. Modeling the relationship of aeration, oxygen transfer and treatment performance in aerated horizontal flow treatment wetlands [J]. *Water Research*, 2019,157:321-334.
- [11] Faria C V, Ricci B C, Silva A F R, et al. Removal of micropollutants in domestic wastewater by expanded granular sludge bed membrane bioreactor [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 136:223-233.
- [12] Koyanagi H, Kuyama T. Analysis of decentralized domestic sewage treatment technologies and facilities in Japan [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28:29-33.
- [13] 刘玲花,张盼伟,王启文.基于源分离的农村分散式生活污水处理技术[J].*水利水电技术*,2019,50(6):196-202.  
Liu Linghua, Zhang Panwei, Wang Qiwen. Source separation-based rural decentralized domestic wastewater treatment technology [J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2019,50(6):196-202.
- [14] 董丽伟,张伟,白璐,等.我国农村生活污水资源化利用现状及模式分析[J].*环境工程技术学报*,2022,12(6):2089-2094.  
Dong Liwei, Zhang Wei, Bai Lu, et al. Analysis on current situation and model of resource utilization of rural sewage in China [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022,12(6):2089-2094.
- [15] 李杉,马鑫文,吴勇,等.川中丘陵区农村生活污水资源

- 化利用后的土壤养分特征[J].水土保持通报,2022,42(6):114-120.
- Li Shan, Ma Xinwen, Wu Yong, et al. Soil nutrient characteristics after rural domestic sewage resource utilization in hilly areas of central Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6): 114-120.
- [16] 张靖雨,汪邦稳,龙昶宇,等.湿地植物对农村生活污水中氮磷的净化作用[J].水土保持通报,2021,41(5): 15-22.
- Zhang Jingyu, Wang Bangwen, Long Changyu, et al. Purification effects of various aquatic plants on nitrogen and phosphorus in rural sewage [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(5):15-22.
- [17] 王曼如,闫湘,李秀英.表面活性剂在农业中的应用及对水环境的危害[J].中国土壤与肥料,2018(6):11-15.
- Wang Manru, Yan Xiang, Li Xiuying. The application of surfactants in agriculture and harm to the water environment [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(6):11-15.
- [18] 尹超.阴离子表面活性剂对城市复合型污染水体好氧反硝化的影响机理及效应研究[D].上海:华东师范大学, 2021.
- Yin Chao. Influence mechanisms and effects of anionic surfactant on aerobic denitrification in polluted and compound urban water [D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [19] 王淞民,刘丽媛,魏孝承,等.土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤环境的影响[J].农业资源与环境学报,2022,39(2):305-318.
- Wang Songmin, Liu Liyuan, Wei Xiaocheng, et al. Effects of rural black-gray water treatment by soil infiltration system on the soil environment of vegetable garden [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022,39(2):305-318.
- [20] 罗泉,张季,王方磊,等.生物炭强化生物滤池处理农村生活污水效果及碳排放[J].农业工程学报,2024,40(2):315-322.
- Luo Xiao, Zhang Ji, Wang Fanglei, et al. Treatment effect and carbon emission of rural domestic sewage by biochar-enhanced biofilter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024,40(2):315-322.
- [21] 潘碌亭,谢欣珏,王九成,等.脱氮除磷生物滤池填料制备及其对农村生活污水的处理效果[J].农业工程学报, 2017,33(9):230-236.
- Pan Luting, Xie Xinjue, Wang Jiucheng, et al. Preparation of denitrification and dephosphorization biological fillers and its effect on treatment of rural domestic sewage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(9):230-236.
- [22] 裴亮,张体彬,陈永莲,等.农村生活污水再生水滴灌对根际土壤特性的影响研究[J].灌溉排水学报,2012,31(4):42-45.
- Pei Liang, Zhang Tibin, Chen Yonglian, et al. Influence of reclaimed water drip irrigation with rural domestic sewage on soil peculiarity in rhizosphere [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012,31(4):42-45.
- [23] 张东华.基于环境保护的农村生活污水处理研究:评《分散型农村生活污水处理技术研究》[J].灌溉排水学报,2022,41(2):149.
- Zhang Donghua. Research on rural domestic wastewater treatment based on environmental protection: Evaluation of "Research on Distributed Rural Domestic Wastewater Treatment Technology" [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(2):149.
- [24] 李欣.农村生活污水农业利用的可行性及其对作物与土壤的影响研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2018.
- Li Xin. Possibility of the agricultural utilization of rural domestic sewage and its influence on soil and crop production [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2018.
- [25] 王云龙,李欣,沈琴琴,等.含阴离子表面活性剂的污水农灌对蔬菜生产的影响[J].浙江农业科学,2019,60(8):1291-1295.
- Wang Yunlong, Li Xin, Shen Qinqin, et al. Effect of irrigation with wastewater including anionic surfactant on water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) product [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019,60(8):1291-1295.
- [26] 杨茜.不同处理程度农村生活污水农田消纳可行性研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2019.
- Yang Xi. Feasibility of agriculture land disposal of sewage treated in different levels [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2019.
- [27] 蒯伟,李厚禹,高艺,等.三格式化粪池出水水质特征及对周边土壤环境的影响[J].农业环境科学学报,2021, 40(5):1051-1061.
- Kuai Wei, Li Houyu, Gao Yi, et al. Environmental risk and influencing factors of effluent from three-compartment septic tanks [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021,40(5):1051-1061.
- [28] 冯永霞,王明霞,倪秀雅,等.重庆酸雨区马尾松纯林改造对土壤溶液性质的影响[J].陆地生态系统与保护学报,2023(2):11-19.
- Feng Yongxia, Wang Mingxia, Ni Xiuya, et al. Effects of transformation of *Pinus massoniana* on chemical characteristics of soil solution in acid rain area in Chongqing, China [J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2023(2):11-19.