宋志成, 黄庭坚, 莫小堂, 等. 农村生活污水资源化利用潜在风险识别:以草地渗滤为例[J]. 净水技术, 2026, 45(10): 88-96.
Song Z C, Huang T J, Mo X T, et al. Identification of potential risks of resource utilization for rural domestic sewage:Case of grassland infiltration[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(10): 88-96.

# 农村生活污水资源化利用潜在风险识别:以草地渗滤为例

宋志成,黄庭坚*,莫小堂,陈志华,郑燕琼
(广州市增城排水有限公司,广东广州 511300)

**摘 要** **【目的】** 为识别广州市农村生活污水资源化利用过程中的潜在环境风险,并为该地区因地制宜推进资源化利用提供风险管控依据,本文以广州市增城区某典型农村生活污水处理设施出水为对象开展研究。**【方法】** 以处理设施达标出水作为灌溉水源,对选定草地进行直接滴灌,设置不同水力负荷处理组,系统监测土壤中化学需氧量(COD)、总磷、氨氮、硝酸盐氮、总氮等污染物的垂向分布与横向迁移特征,并采用 Pearson 相关分析法量化水力负荷与各污染物富集程度之间的关联强度。**【结果】** 研究数据表明:(1)随着水力负荷增大,土壤中含氮物质(氨氮、硝酸盐氮、总氮)积累量显著增加,与水力负荷的 Pearson 相关系数分别高达 1.00、0.99、0.95;(2)土壤溶液中 COD 与总磷含量受水力负荷变化影响较小,无明显累积趋势;(3)氨氮、硝酸盐氮、总氮等含氮污染物不仅在土壤垂向剖面中呈现富集趋势,且在横向存在明显的迁移扩散风险。**【结论】** 农村生活污水长期资源化利用中,含氮物质的环境累积与横向迁移是首要风险因子,需纳入重点管控范畴。建议在实际应用中根据土壤渗滤能力合理确定处理负荷,采用多地块轮换交替进水方式分散污染物输入压力,并结合草地定期翻耕等农艺措施促进氮素转化与消减,以有效降低长期利用带来的土壤与地下水污染风险。

**关键词** 农村生活污水; 渗滤; 资源化利用; 土壤溶液; 风险评估
**中图分类号**: X799.3 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)10-0088-09
**DOI**: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.10.010

## Identification of Potential Risks of Resource Utilization for Rural Domestic Sewage: Case of Grassland Infiltration

**Song Zhicheng, Huang Tingjian*, Mo Xiaotang, Chen Zhihua, Zheng Yanqiong**
(*Guangzhou Zengcheng Drainage Co., Ltd., Guangzhou* 511300, *China*)

**Abstract** [**Objective**] This paper aims to identify the potential environmental risks during the resource-oriented utilization of rural domestic sewage in Guangzhou, and to provide a scientific basis for risk control and management to support the context-specific promotion of such utilization in the region. To this end, the effluent from a representative rural domestic sewage treatment facility in Zengcheng District, Guangzhou, is selected as the research subject. [**Methods**] The treated effluent, meeting discharge standards, was used as irrigation water for direct drip irrigation of a designated grassland. Various hydraulic loading rates were applied across treatment groups. Systematic monitoring was conducted to examine the vertical distribution and horizontal migration patterns of pollutants in the soil, including chemical oxygen demand (COD), total phosphorus, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen. Pearson correlation analysis was employed to quantify the relationships between hydraulic loading rates and pollutant accumulation. [**Results**] The research data indicated that: (1) The accumulation of nitrogenous substances (ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen) in the soil increased significantly with rising hydraulic loading rates, with Pearson correlation coefficients reaching as high as 1.00, 0.99, and 0.95, respectively; (2) The contents of COD and total phosphorus in the soil solution showed no significant variation or accumulation trend in response to changes in hydraulic loading; (3) Nitrogenous pollutants, including ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen, not only exhibited a clear enrichment trend in the vertical soil profile but also demonstrated considerable potential for lateral migration and dispersion. [**Conclusion**] The long-term resource-oriented

[收稿日期] 2024-08-26
[作者简介] 宋志成(1991— ),男,工程师,主要从事农村生活污水资源化利用与环境风险控制等工作,E-mail:songzhichengid@163.com。
[通信作者] 黄庭坚(1996— ),男,工程师,主要从事农村生活污水资源化利用与环境风险控制等工作,E-mail:1044609573@qq.com。

utilization of rural domestic sewage poses primary environmental risks associated with the accumulation and lateral migration of nitrogenous substances, which should be prioritized in risk management strategies. To mitigate the potential risks of soil and groundwater contamination, it is recommended that the hydraulic loading rate be rationally determined based on the infiltration capacity of the soil, that a rotational irrigation scheme involving multiple plots be implemented to distribute pollutant inputs, and that agronomic measures such as regular grassland tillage be adopted to facilitate nitrogen transformation and removal.

**Keywords** rural domestic sewage; infiltration; resource utilization; soil solution; risk assessment

生态环境部、农业农村部于2023年联合发布的《关于进一步推进农村生活污水治理的指导意见》明确提出“优先采取资源化利用的治理模式”,要求“就近就地实现农村生活污水资源化利用”。可见,资源化利用模式已是目前我国农村生活污水治理的重点工作方向,目前已有大量关于农村生活污水资源化利用的研究。如董丽伟等[1]研究了我国农村生活污水资源化利用现状后得出不同资源化利用模式的运维成本仅为0.05~0.15元/t;李瑜[2]在探究农村生活污水资源化利用的必要性与可行性时得出不同模式的资源化利用建设费用仅为200~400元/户的结论;吴广祥[3]在分析农村生活污水资源化利用模式时表明,资源化利用技术有利于减少工程投资,降低污水治理成本,具有良好的经济技术效益。研究证明,资源化利用模式在治理有效的同时可缓解运维资金压力,但如何科学合理地推行资源化利用成为其中关键。有研究[4-7]表明,生活污水会对土壤理化性质、土壤微生物及作物产生负面影响,但也有研究[8-9]表明,科学合理地利用农村生活污水对作物生产具有积极作用。

目前国内外对污水的资源化利用基本借助了较为强大的预处理设施或措施,鲜有人尝试直接利用厌氧池作为预处理设施来开展资源化利用。本文旨在进一步探究农村生活污水资源化利用过程中污染物削减过程以及系统研究污水慢速渗滤对土壤安全的影响。土壤渗滤系统是处理农村分散式生活污水的工艺之一,一般具体做法是通过土壤的毛细管浸润、渗滤及一系列生物化学作用,将污水净化。本文将以广州市增城区某村的单一厌氧池工艺为研究对象,开展单一厌氧池出水直接渗滤草地的风险调查,以期为农污资源化利用模式的推广提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验场地搭建及采样方案

本次试验场地位于广州市增城区正果镇麻冚村排赖排老排新社。场地污水处理工艺为单一厌氧池,设计规模为3 t/d,污水经处理后排放至附近灌溉渠,该设施近年进出水情况如表1所示。

该站点2022年—2023年进出水水质数据如表1所示。数据呈现指标质量浓度夏季低、冬季高的规律,与广州地区夏季多雨的气候有关。尽管收集管网已实现雨污分流,但汛期不可避免有雨水进入污水管网,进而导致进水质量浓度偏低。《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)规定,对灌溉水源水质要求主要指标为化学需氧量(COD)和氨氮。以上数据表明,该单一厌氧池设施出水中COD和氨氮均未超出标准限值。

**表1 厌氧池进出水水质**

Tab. 1 Influent and Effluent Quality of Anaerobic Tank

| 时间 | COD/(mg·L$^{-1}$) | | 氨氮/(mg·L$^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|
| | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 |
| 2022年第一季度 | 126.00 | 86.00 | 27.30 | 21.20 |
| 2022年第二季度 | 64.00 | 38.00 | 19.30 | 18.80 |
| 2022年第三季度 | 20.00 | 8.00 | 8.55 | 8.50 |
| 2022年第四季度 | 55.00 | 29.50 | 27.00 | 19.10 |
| 2023年第一季度 | 55.50 | 50.50 | 29.40 | 26.00 |
| 2023年第二季度 | 26.00 | 20.50 | 3.84 | 4.56 |
| 2023年第三季度 | 23.50 | 23.50 | 2.44 | 3.22 |
| 2023年第四季度 | 84.00 | 17.00 | 32.50 | 25.90 |

本试验模拟农村用水习惯,定时定量(时间继电器及流量计控制)将厌氧池污水排放至附近草地进行滴灌,同时搭建大棚,避免雨水对试验结果产生影响。试验污水渗滤场地总面积约为100 m$^2$,划分为4个试验区域,并在表层土壤直接滴灌(图1),分别记为T3、T2、T1、KB。渗滤的有效面积约为6 m$^2$。T3、T2、T1和KB试验区水力负荷分别为0.050、0.010、0.005 m$^3$/(m$^2$·d)和0.000 m$^3$/(m$^2$·d)。经过一定时间渗滤后采集滴灌点位的土壤,通过负压的方式对土壤抽取出溶液样品进行检测,评估单一厌氧池处理工艺生活污水资源化利用过程中各指标的迁移转化规律及风险。

### 1.2 进水负荷及采样点位布置

在滴灌60 d后采集厌氧池进出水和渗滤土壤。

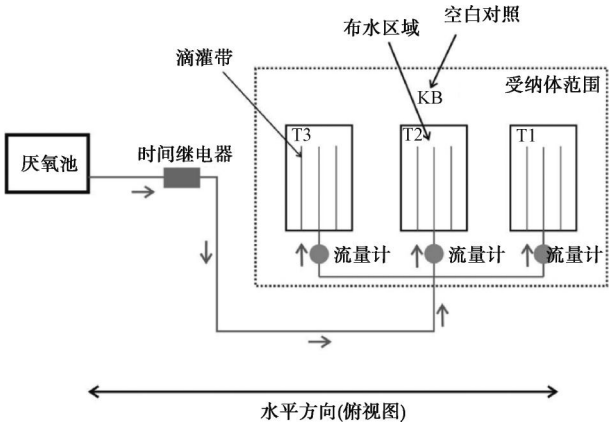



**图 1　草地土壤渗滤平面图**

Fig. 1　Planar of Grassland Soil Infiltration

使用土壤溶液取样器原位采集,场地左右设置平行对照组,命名方式如图 2 所示。空白对照组命名为 KB 组,每个点位都分别埋设 20 cm 深度的表层土壤溶液取样器。如表 2 所示,厌氧池出水质量浓度各项指标均符合 GB 5084—2021 排放标准。

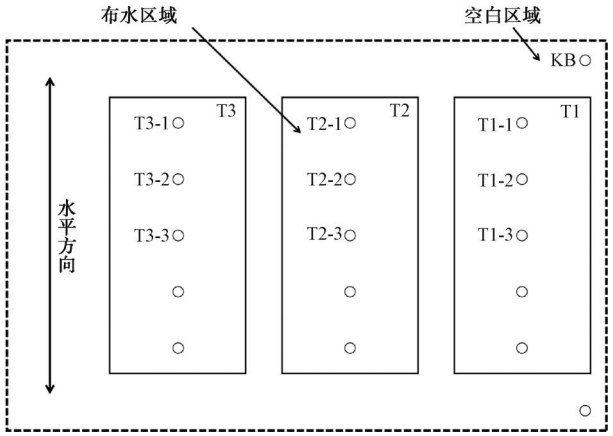



**图 2　土壤溶液采样示意图**

Fig. 2　Schematic of Soil Solution Sampling

**表 2　60 d 时厌氧池进出水水质**

Tab. 2　Influent and Effluent Quality of Anaerobic Tank after 60 Days

| 指标名称 | 进水 | 出水 | GB 5084—2021 限值 |
|---|---|---|---|
| 总氮/(mg·L$^{-1}$) | 31.9 | 26.6 | — |
| 总磷/(mg·L$^{-1}$) | 1.94 | 1.05 | — |
| COD/(mg·L$^{-1}$) | 41.5 | 31.0 | 200 |
| 氨氮/(mg·L$^{-1}$) | 30.7 | 24.0 | — |
| 硝酸盐氮/(mg·L$^{-1}$) | <0.016 | <0.016 | — |
| pH 值 | 7.8 | 7.6 | 5.5~8.5 |
| 电导率/(μS·cm$^{-1}$) | 324.3 | 427.8 | — |
| 阴离子表面活性剂/(mg·L$^{-1}$) | 3.71 | 0.11 | 8 |

## 2　结果与分析

### 2.1　渗滤土壤溶液结果

#### 2.1.1　pH

研究表明,土壤 pH 是影响土壤微生物活性的关键因素。过酸或过碱都会严重抑制土壤微生物的活动,进而影响氮素及其他养分的转化和供应[10-11]。除此之外,土壤 pH 还会影响土壤结构,进而导致板结,通气透水性变差等情况,影响作物生长[12]。本调查发现,可能由于土壤自身的调节作用,经过 60 d 滴灌后渗滤土壤溶液并未发生异常,如图 3 所示,不同点位土壤溶液的 pH 值为 7.6~8.1,调查数据证明,土壤溶液 pH 并未受农村生活污水资源化利用的影响。

#### 2.1.2　电导率

电导率作为土壤性质的一项重要指标,能够有效反映土壤的盐渍化程度。土壤电导率与土壤混合盐含量直接相关,通过测定土壤的电导率,可以间接地了解土壤盐分的实际状况。王泽林等[13]研究表明,

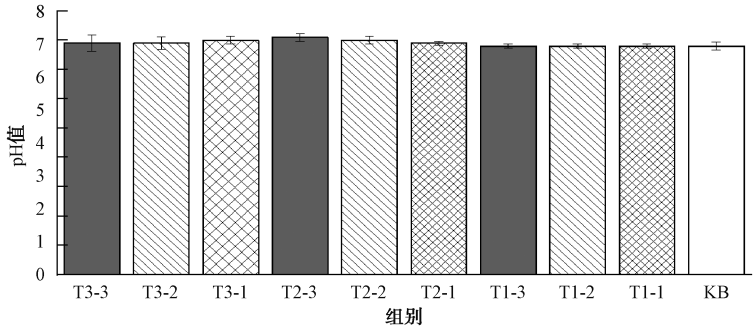



**图 3　60 d 后各负荷土壤溶液 pH 值**

Fig. 3　pH Values of Soil Solutions under Various Loads after 60 Days

土壤离子含量积累到一定程度时将导致土壤的碱化，从而影响土壤的入渗和传导能力，影响作物的正常生长和产量。滴灌 60 d 后，各负荷土壤溶液数据表明，不同负荷的电导率都在 250 μS/cm 以下，《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求饮用水溶解性总固体(TDS)质量浓度应不大于 1 000 mg/L(换算成电导率为 1 560 μS/cm)，本调查结果显示，农村生活污水的资源化利用并不会对土壤电导率产生不利影响。然而，需要注意到 T3-3、T2-3、T1-3 组的电导率相有机物质含量是农村生活污水的主要监测指标。COD 的含量越高表明土壤溶液中存在的有机物越多，长此以往会影响微生物和植物根系的繁殖和生长。汪宏等[14]在改良地下渗滤系统运行过程中发现 COD 去除效果良好，微生物会将大分子物质逐渐降解为小分子物质。在本次调查结果中(图 4)，在高、中、低 3 种水力负荷状况下渗滤土壤对 COD 有一定的自我调节作用，并未呈现富集的现象。更进一步地，高负荷组的 COD 含量比中低负荷组有了明显的下降，说明渗滤环境能适应设施出水的滴灌，并对其中的有机物进行吸收。总体来看，由于本次调查试验所有土壤溶液的 COD 质量浓度都在 30 mg/L 以下，远低于《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)及《广东省农村生活污水处理排放标准》(DB 44/2208—2019)中对 COD 的限值，且对比 60 d 组高负荷区域(T3-3、T2-3、T1-3)及低负荷区域(T3-1、T3-12、T2-1、T2-12、T1-1、T1-12)的样品可知，各组之间 COD 质量浓度并无明显差异，没有积累的趋势，甚至出现高负荷区域所测 COD 质量浓度低于低负荷区域的情况，由此可知，在一定负荷的前提下，农村生活污水的资源化利用并不会对渗滤环境产生明显影响。

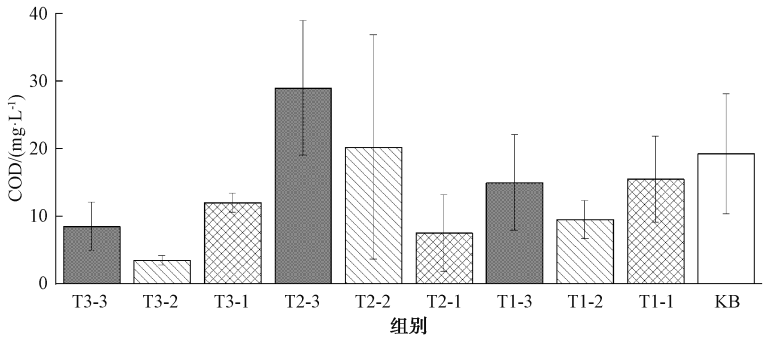



**图 4　60 d 后各负荷土壤溶液 COD 质量浓度**

Fig. 4　COD Mass Concentration of Soil Solutions under Various Loads after 60 Days

2.1.3　氨氮

生活污水中氮主要以氨氮形式存在，利用土壤渗滤系统除氮效果不佳。带负电荷的土壤胶体颗粒与带正电荷的氨氮相互吸附，土壤中硝化细菌进行硝化反应生成硝酸盐氮。当污水中的氨氮超出土壤胶体颗粒的吸附能力，就有可能造成氨氮的积累[15]。在本次调查中，60 d 后设施出水氨氮质量浓度为 24 mg/L，而土壤溶液中氨氮的平均质量浓度为 0.59 mg/L，如图 5 所示。高负荷区域(T3、T2)的氨氮质量浓度明显高于中低负荷及空白区域(T1、

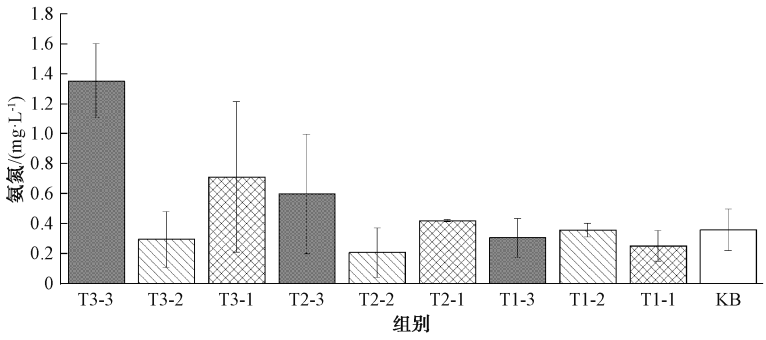



**图 5　60 d 后各负荷土壤溶液氨氮质量浓度**

Fig. 5　Ammonia Nitrogen Mass Concentration of Soil Solutions under Various Loads after 60 Days

KB)。可知,一段时间的污水排放会对渗滤土壤溶液的氨氮质量浓度产生影响,仍需关注长期灌溉中氨氮在渗滤系统的积累及其造成的影响。在土壤渗漏过程中,氨氮的转化过程较为复杂,目前有研究表明,土壤中氨氮的迁移转化反应主要为硝化及反硝化反应、厌氧氨氧化反应等,其中硝化反硝化反应占主要地位。因此,污水的资源化利用应注意合理设置布水负荷,若布水负荷过大则容易导致土壤中空气不足进而抑制硝化反应进行,造成氨氮的积累。

2.1.4 硝酸盐氮

由图 6 可知,空白及中低负荷区域(T2、T1、KB)硝酸盐氮平均质量浓度分别为 1.180、1.042、0.210 mg/L,而高负荷区域(T3)的平均质量浓度为 3.53 mg/L,可见渗滤系统受污水影响发生了明显的硝酸盐氮积累。

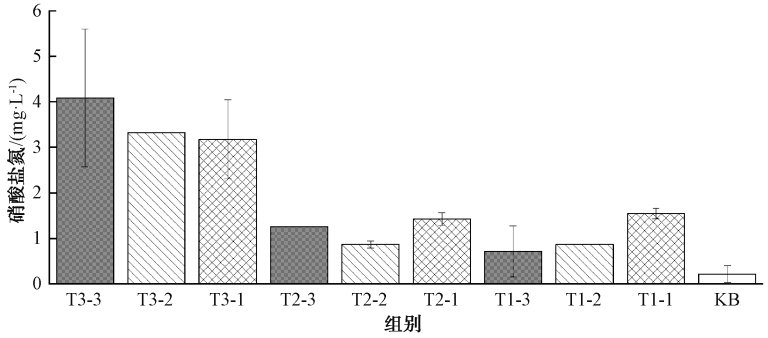



**图 6 60 d 后各负荷土壤溶液硝酸盐氮质量浓度**

Fig. 6 Nitrate Nitrogen Mass Concentration of Soil Solutions under Various Loads after 60 Days

本次调查中厌氧池进水硝酸盐氮未被检测到,可知消纳后所得土壤溶液中主要的硝酸盐氮并非直接来源于滴灌污水或土壤溶液背景值。因此,可以判断土壤溶液的硝酸盐氮主要是进水中氨氮硝化反应后产生。研究[16]表明,土壤内部不同区域会建立起稳定的好氧区及厌氧区,各区域的优势微生物迅速繁殖且比例协调生长。李英华等[17]的研究表明,硝化作用主要发生在填料层的上部好氧区,反硝化作用则在下部厌氧区进行。因此可以得到污水资源化利用中氮元素的形态转化过程:本试验主要在土壤表层,土壤中氧质量浓度充足,且进水中氨氮质量浓度较高,带正电荷的氨氮离子被带负电荷的土壤截留并被硝化菌转化为硝酸盐氮,硝酸盐氮无法在有氧环境下进行反硝化反应而造成表层土壤中硝酸盐氮的积累。

根据我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的要求,硝酸盐氮的质量浓度标准限值为 10 mg/L。对于纯净水源区和饮用水源地,硝酸盐氮的质量浓度限值应更严格,一般应控制在 1 mg/L 以下。另外,根据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017),Ⅲ类水质标准硝酸盐(以 N 计)质量浓度应≤20 mg/L。世界卫生组织也规定地下水的硝酸盐氮质量浓度不得超过 10 mg/L。可见硝酸盐氮在农村生活污水资源长期利用的过程中将会超出规范限制,建议定期采取工程措施以降低硝酸盐氮。

2.1.5 总氮

土壤中的总氮对维持土壤健康和肥力至关重要。过高的氮含量会破坏土壤的内部生态平衡,影响植物的生长情况。此外,由于作物对氮素的吸收和利用能力有限,过多的氮素无法被有效利用,最终可能通过径流、淋溶等方式进入地下水体,造成水环境污染,因此在农村生活污水资源化长期利用的过程中应关注环境中总氮的积累风险。

由图 7 可知,高负荷区域(T3)土壤溶液总氮质量浓度明显高于较中低负荷区域及空白区(T2、T1、KB),其中 T3-3 组总氮质量浓度为 7.29 mg/L,KB 组为 1.045 mg/L,可见渗滤土壤溶液的总氮有着明显的积累趋势。霍宇庄等[18]认为利用污水长期直接灌溉农田会导致总氮含量的增加,如果污水质量浓度较高,将对地下环境带来污染风险。本试验中厌氧池对污水中总氮去除能力较差,出水总氮质量浓度并不稳定,甚至存在“出大于进”的问题,导致了土壤溶液中总氮的积累。

目前已有研究探究如何提高土壤总氮的去除率,如张思等[16]以粉煤灰和腐熟牛粪作为填料配合土壤,可有效加强总氮去除率,平均去除率稳定在

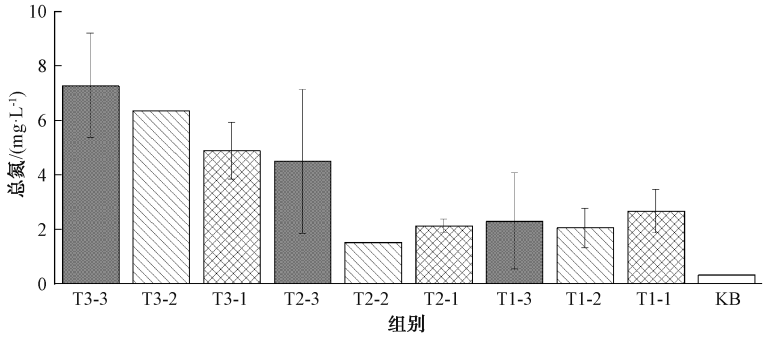



**图 7　60 d 后各负荷土壤溶液总氮质量浓度**

Fig. 7　Total Nitrogen Mass Concentration of Soil Solutions under Various Loads after 60 Days

79%以上。李丹等[19]采用两段耦合式土壤渗滤系统,在分流比为 1∶2 时总氮去除率达到 72.27%。严群等[20]探究煤渣及土壤的分层装填对总氮的去除率影响,发现总氮去除率可达到 61.9%。因此农村生活污水资源化时可考虑增加填料或者利用硝化反硝化耦合作用以增强渗滤系统总氮的去除能力。

2.1.6　总磷

农村生活污水中的总磷可作为营养物质被微生物及植物所利用转化,被认为是磷肥的有效补充品,土壤对总磷中可溶性磷酸盐的吸附与土壤 pH 有关。吕晶晶等[21]的研究表明,改良型土壤渗滤系统对磷有着非常好的去除效果,去除率能达到 90%以上,原因是土壤中存在大量 $Al^{3+}$、$Fe^{3+}$、$Ca^{2+}$等离子形成的胶体颗粒可以通过物理化学吸附作用去除水中磷酸盐。由 2.1.1 节可知试验点土壤总体呈弱碱性,因此可以推测总磷能够与土壤中 $Fe^{3+}$和 $Al^{3+}$结合形成沉淀。本次试验所取土壤溶液总磷质量浓度在 0.08 mg/L 以下,且不同负荷对照之间并未发现有明显的累积趋势(图 8)。此外,调查厌氧池设施出水总磷质量浓度均大于 3 mg/L,虽然中高负荷布水区域(T3、T2)土壤溶液的总磷质量浓度高于低负荷及空白区域(T1、KB),但总体质量浓度较低,说明渗滤系统对总磷吸收能力较强。以上结果说明,植物-土壤渗滤系统长期处理设施出水中的总磷有较好的吸收效果,污水的资源化长期利用并不会对环境产生磷超标问题。

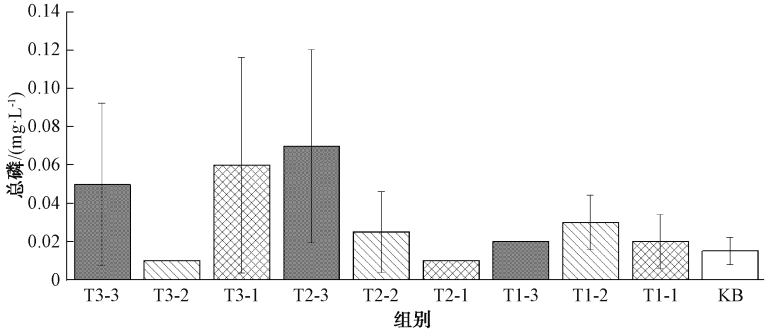



**图 8　60 d 后各负荷土壤溶液总磷质量浓度**

Fig. 8　Total Phosphorus Mass Concentration of Soil Solutions under Various Loads after 60 Days

2.1.7　表面活性剂

随着农村生活的改善,其污水水质成分也日趋复杂,其中餐饮废水排放量与日俱增。在各类洗涤剂中,阴离子表面活性剂的使用最为广泛,其排放量已纳入多地排放标准控制指标[22]。有研究表明,污水中的表面活性剂会改变微生物的种群结构和分布特征,而阴离子表面活性剂中最重要、产量最大的直链烷基苯磺酸盐(LAS)对真菌的生长及土壤转氨酶和脱氧酶存在抑制作用,甚至破坏菌体的细胞壁结构,从而导致菌种的迅速死亡,即使是低剂量也会抑制细胞胞壁降解酶的活性。

本次亦同步调查了农村生活污水资源化利用过程中阴离子表面活性剂的变化趋势。其中 60 d 组

别土壤溶液中仅有 T1-3 中检出质量浓度为 0.08 mg/L(其余点位检测值为 0),参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)可知,农村生活污水在资源化短期利用过程中对渗滤土壤溶液不会有阴离子表面活性剂污染风险。

## 2.2 各指标与水力负荷的相关性分析

为分析土壤溶液中各指标之间的相关性,T3-3、T2-3、T1-3、KB 组的数据作为参考,采用 Pearson 相关系数对各指标与负荷之间进行分析。由图 9 可知,水力负荷与土壤溶液电导率(0.95)、氨氮(1.00)、硝酸盐氮(0.99)、总氮(0.95)之间展现出极高的正相关性。值得注意的是,氨氮与硝酸盐氮的正相关性较强(0.99),说明硝酸盐氮的积累与氨氮有直接关系;此外,总氮和硝酸盐氮两个指标间同样有着较强的正相关性(0.95)。作为各种形态含氮化合物中最稳定的氮化合物,硝酸盐氮在表层土壤的积累受氨氮含量的影响,因此去除硝酸盐氮的关键是去除氨氮。

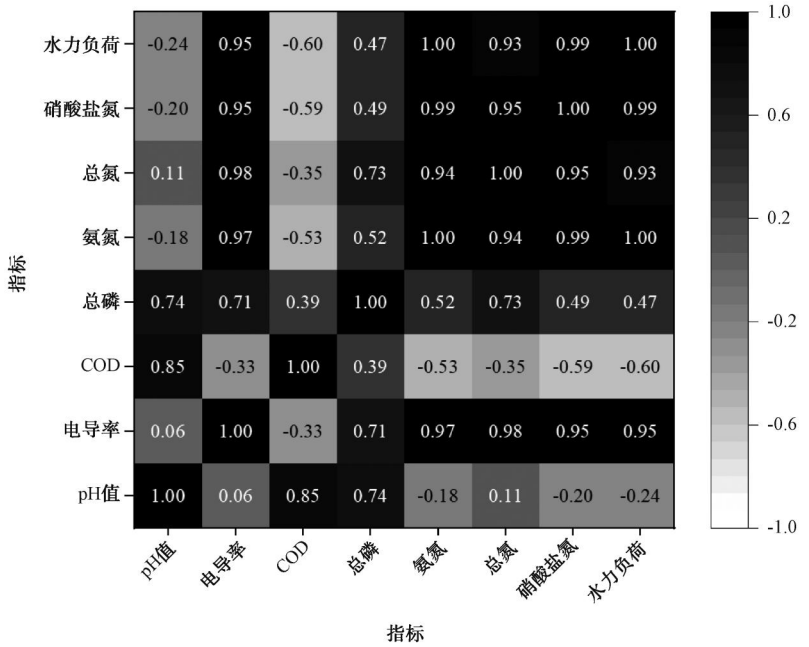



**图 9 TN-3 区域各指标间相关系数**

Fig. 9 Correlation Coefficients among Various Indicators in TN-3 Area

## 2.3 土壤指标分析

在试验场运行 60 d 后,对 T3-3、T2-3、T1-3、KB 组表层土壤进行取样,并对有机质、氨氮、硝酸盐氮、总氮、总磷这 5 个指标进行了检测,结果如表 3 所示。

根据厌氧池出水进入草地渗滤系统后土壤有机质分布情况,可以发现,对比各组有机质并未发生积累现象,这点与 2.1.2 节土壤溶液 COD 质量浓度分布情况相似;从土壤硝酸盐氮、总氮含量可以看出氮元素并未在土壤中发生积累现象;而 T3-3 组土壤氨氮明显高于其余组别,土壤中氨氮含量会随着水力负荷增大而增大,渗滤系统并未能维持平衡;经过对比,可以发现总磷并未在土壤中发生积累,这点同样与 2.1.6 节结论相同。

**表 3 60 d 后土壤指标统计**

Tab. 3 Statistics of Soil Indices after 60 Days

| 组别 | 有机质/(g·kg$^{-1}$) | 氨氮/(mg·kg$^{-1}$) | 硝酸盐氮/(mg·kg$^{-1}$) | 总氮/(mg·kg$^{-1}$) | 总磷/(mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| T3-3 | 3.88 | 4.40 | 1.34 | 600.44 | 190.11 |
| T2-3 | 6.17 | 0.54 | 1.57 | 520.76 | 200.36 |
| T1-3 | 13.41 | 1.56 | 2.10 | 973.90 | 182.88 |
| KB | 11.76 | 1.20 | 1.23 | 819.93 | 292.09 |

### 2.4 运行成本分析

本试验由于是通过单一厌氧池出水直接滴灌至草地,因此成本仅包括站点运行费用,每月运行费用如表4所示。通过运行一段时间后的测算得出,站点的运行费用约为788元/月,证明资源化利用具有运维费用低的优势。

**表4 厌氧池每月运行费用明细**

Tab. 4 Details of Monthly Operation Costs the Anaerobic Tank

| 项目 | 费用/(元·月$^{-1}$) |
|---|---|
| 人工 | 400 |
| 电费 | 68 |
| 车辆油费 | 120 |
| 加药 | 0 |
| 污泥处置 | 100 |
| 场地租金 | 100 |
| 合计 | 788 |

注:表格中所有费用基于站点处理量为3 t/d。

## 3 结论

本文以广州市增城区某村的单一厌氧池工艺为研究对象,通过开展单一厌氧池出水资源化利用的风险调查,探究在市内农村生活污水资源化利用过程中污染物削减过程及对渗滤系统的影响,得出了以下几个主要结论。

(1)渗滤土壤溶液及土壤的COD、总磷经过滴灌后并未发生明显的异常变化,试验数据表明在保证一定水力负荷的前提下,农村生活污水的资源化利用过程并未导致渗滤土壤肥力变化,说明土壤作为渗滤系统对COD、总磷具有一定的吸收能力,潜在的环境风险较低且可控。

(2)渗滤土壤中总氮、硝酸盐氮等污染物在高负荷下并未受明显影响;而土壤溶液则存在明显积累的风险,有富集的趋势,并在空白对照区域有迁移扩散的风险,高的水力负荷与氨氮、硝酸盐氮、总氮质量浓度具有强正相关性,系数依次高达1.00、0.99、0.95;氨氮与硝酸盐氮的正相关性较强,说明硝酸盐氮的积累依赖于氨氮的转化,需要降低处理负荷或采用数块土地交替进水、在旱季对草地翻耕的措施,使渗滤系统中积累饱和的污染物得以降解、含氮物质等可被植物所吸收去除。

(3)厌氧池出水水质不稳定、对氨氮、总氮处理能力差,是土壤中氮元素积累的主要原因,可通过将旧厌氧池改造成为缺氧+好氧组合池或延长水力停留时间以提高处理能力和降低运行费用。

本次调查涉及变量较多,要探寻单一厌氧池对渗滤系统的风险仍有许多需要进一步研究之处,接下来可将试验场地由搭建大棚改变为开放露天受纳体,在全真试验场景下可以得出更为准确的结论。

## 参考文献

[1] 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 L W, Zhang W, Bai L, 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.

[2] 李瑜. 农村生活污水资源化利用技术模式及工程示范[J]. 净水技术, 2024, 43(2): 83-89, 96.
Li Y. Engineering demonstration and technological mode of resource ulitiation of rural domestic wastewater[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2): 83-89, 96.

[3] 吴广祥. 华南农村生活污水治理资源化利用技术工程适用性及推广应用[J]. 环境工程学报, 2024, 18(1): 280-285.
Wu G X. Engineering applicability analysis and application of rural domestic sewage resource utilization technology in Southern China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(1): 280-285.

[4] 陈东海, 徐婷婷, 李丹丹, 等. 农村生活污水原污水、再生水灌溉对林地植物生长及土壤理化性质的影响[J]. 陕西农业科学, 2024, 70(3): 78-89.
Chen D H, Xu T T, Li D D, et al. Effect of untreated and recycled wastewater irrigation from rural areas on forest plant growth and soil physicochemical properties[J]. Shannxi Journal of Agricultural Sciences, 2024, 70(3): 78-89.

[5] 张丹丹, 郑向群, 李厚禹, 等. 含盐农村生活污水灌溉对土壤微生物的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(8): 1873-1884.
Zhang D D, Zheng X Q, Li H Y, et al. Effects of rural domestic sewage irrigation with different salinity on soil microorganisms[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(8): 1873-1884.

[6] 郭丹丹, 贺颂兵, 郭雪, 等. 再生水浇灌对城市绿地土壤微生物群落组成的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(3): 513-520.
Guo D D, He S B, Guo X, et al. Effects of reclaimed water irrigation on soil microbial community composition in urban green space[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(3): 513-520.

[7] 张曼玉, 陆晟, 万蕾, 等. 污水灌溉对作物生长影响及重金

属富集规律研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(增刊1): 174-177.
Zhang M Y, Lu S, Wan L, et al. Research progress on the influence of sewage irrigation on crop growth and the enrichment law of heavy metals[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S1): 174-177.

[8] 李松旌, 樊向阳, 崔二苹, 等. 滴头流量对再生水灌溉作物根区典型微生物群落结构的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 26-35.
Li S J, Fan X Y, Cui E P, et al. Effects of dripping rate with reclaimed water on typical microbial community structure in the root zone soil of tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 26-35.

[9] Magwaza S T, Magwaza L S, Odindo A O, et al. Partially treated domestic wastewater as a nutrient source for tomatoes (*Lycopersicum solanum*) grown in a hydroponic system: Effect on nutrient absorption and yield[J]. Heliyon, 2020, 6(12): e05745.

[10] 张晨阳, 孙力扬, 徐明岗, 等. 土壤微生物碳利用效率对农田管理措施响应的机制[J]. 土壤学报, 2025, 62(1): 177-188.
Zhang C Y, Sun L Y, Xu M G, et al. Response mechanisms of soil microbial carbon use efficiencies to cropland management measures[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(1): 177-188.

[11] 朱建宁, 刘杰, 王昌昆, 等. 三江平原县域耕地土壤细菌多样性分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2024, 43(10): 3005-3014.
Zhu J N, Liu J, et al. The distribution characteristics and influencing factors of soil bacterial diversity in cultivated land at the county scale in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(10): 3005-3014.

[12] 罗雪娇, 王志春, 杨帆. 苏打盐碱土壤黏粒分散特征研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(2): 255-263.
Luo X J, Wang Z C, Yang F. Research progress on clay dispersion characteristics of saline-sodic soil[J]. Soils, 2024, 56(2): 255-263.

[13] 王泽林, 杨广, 王春霞, 等. 咸水灌溉对土壤理化性质和棉花产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2019, 37(6): 700-707.
Wang Z L, Yang G, Wang C X, et al. Effects of saline water irrigation on cotton yield and soil physicochemical properties[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2019, 37(6): 700-707.

[14] 汪宏, 严群, 张越, 等. 添加生物基质对地下渗滤系统污水处理效果的影响[J]. 工业水处理, 2016, 36(12): 31-34.
Wang H, Yan Q, Zhang Y, et al. Influences of adding bio-substrates to subsurface wastewater infiltration systems on the wastewater treatment effect[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(12): 31-34.

[15] 丁越. 复合填料渗滤系统污水处理效果及其脱氮机理研究[D]. 赣州:江西理工大学,2019.
Ding Y. Study on sewage treatment effect and mechanism of nitrogen removal in compromise filler infiltration system[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.

[16] 张思, 宁国辉, 杨铮铮, 等. 复合填料土壤渗滤系统处理农村生活污水的效果[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4625-4630.
Zhang S, Ning G H, Yang Z Z, et al. Effect of rural decentralized sewage treatment by composite filler SIS[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11): 4625-4630.

[17] 李英华, 孙铁珩, 李海波, 等. 地下渗滤系统不同基质层对污染物的去除效果[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(5): 737-740.
Li Y H, Sun T H, Li H B, te al. Effects of subsurface depths on pollutant removal with SWIS[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2010,31(5): 737-740.

[18] 霍宇庄, 彭金岭. 污水灌溉对土壤及地下水环境的污染分析[J]. 环境与发展, 2020, 32(3): 61-62.
Huo Y Z, Peng J L. Analysis of pollution of soil and groundwater environment by sewage irrigation[J]. Environment and Development, 2020, 32(3): 61-62.

[19] 李丹, 王欣泽, 沈剑, 等. 分流两段式土壤渗滤系统脱氮效果及机理研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 666-673.
Li D, Wang X Z, Shen J, et al. Nitrogen removal performances and mechanisms in a two-stage soil infiltration system by shunt distributing wastewater[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 666-673.

[20] 严群, 汪宏, 卢艳秋, 等. 生物基质强化地下渗滤系统脱氮效果的研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 96-99.
Yan Q, Wang H, LU Y Q, et al. Bio-substrate enhanced nitrogen removal in subsurface wastewater infiltration system[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 96-99.

[21] 吕晶晶, 窦艳艳, 张列宇, 等. 改良型土壤渗滤系统处理生活污水脱氮除磷[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 38-43.
Lü J J, Dou Y Y, Zhang L Y, et al. Nitrogen and phosphorus removal of domestic sewage treated by modified soil infiltration system[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 38-43.

[22] 朱世泰, 申丽芬, 王广华. 农村生活污水排放标准统计分析及思考[J]. 给水排水, 2022, 48(增刊1): 113-118.
Zhu S T, Shen L F, Wang G H. Statistical analysis on discharge standard of rural sewage[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(S1): 113-118.