

· 创新与探索 ·

浙江省农村生活污水电导率与水质指标的响应关系分析

楼显盛, 陈安瑶, 张研, 林强, 罗安程, 梁志伟*
(浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对浙江省嘉兴市、湖州市长兴县、金华市金东区、绍兴市柯桥区开展农村生活污水水质调研工作, 结果表明: 农村生活污水进出水的电导率、TN、NH₃-N、TP 等指标间普遍存在极显著相关性。通径分析结果显示, TN 的进出水直接通径系数分别为 0.472 0、0.455 9, TN 是影响进出水电导率的主要指标; 电导率-TN 含量的拟合方程经验证表明, 进出水中实际 TN 值与拟合 TN 值相关系数分别为 0.682 6 和 0.785, 均在 0.01 水平上呈显著相关, 说明电导率值与水中的 TN 含量之间具有相关关系, 电导率在一定程度上能够反映污水中的 TN 含量。

关键词: 电导率; 水质指标; 响应关系; 农村; 生活污水; 浙江省

中图分类号: X502 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-2009(2022)01-0064-04

Response Relationship between Conductivity and Water Quality Index of Rural Domestic Sewage in Zhejiang

LOU Xian-sheng, CHEN An-yao, ZHANG Yan, LIN Qiang, LUO An-Cheng, LIANG Zhi-wei*
(College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: An investigation on water quality of rural domestic sewage was carried out in Jiaxing City, Changxing County of Huzhou City, Jindong District of Jinhua City and Keqiao District of Shaoxing City, Zhejiang Province. The results showed that there was a very significant correlation among the conductivity, TN, NH₃-N, TP and other indexes of influent and effluent of rural domestic sewage. The results of path analysis showed that the direct path coefficients of TN in influent and effluent were 0.472 0 and 0.455 9, respectively. TN was the main index affecting the conductivity of influent and effluent. The fitting equation of conductivity-TN content showed that the correlation coefficients between actual TN content and fitted TN content of influent and effluent were 0.682 6 and 0.785, respectively, which were significantly correlated at the level of 0.01. This indicated that there was a correlation between conductivity and TN content in water, and conductivity could reflect TN content in rural domestic sewage to a certain extent.

Key words: Conductivity; Water quality index; Response relationship; Countryside; Domestic sewage; Zhejiang Province

我国农村地区生活污水处理设施数量多且分布广^[1], 若缺乏有效的运维监管, 则可能产生集中排污的不良后果^[2], 造成生态环境的污染^[3-4]。传统的人工监管模式费时费力且效率低下^[5], 基于互联网的远程在线监测不仅可降低成本, 提高效率, 还能实现区域性统筹管理, 确保农村生活污水处理设施正常运行^[6]。

远程在线监测主要包括水质监测和水量监测^[7], 受限于经济、技术等多方面因素, 农村地区

目前仍难以实现全面的水质在线监测。农村生活污水普遍含有 NH₄⁺、NO₃⁻、PO₄³⁻ 等离子^[8], 在电场作用下可以导电。在固定温度、电极条件下, 电导

收稿日期: 2020-12-01; 修订日期: 2021-11-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项基金资助项目(2017ZX07206-004)

作者简介: 楼显盛(1996—), 男, 浙江义乌人, 硕士, 主要从事水体污染控制与治理研究。

* 通信作者: 梁志伟 E-mail: zhiweiliangzg@zju.edu.cn

率主要由水溶液中所含离子的总量决定,即与水溶液中所含可电离总盐成正比,且电导率在一定程度上能够反映水中总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_3 - \text{N}$)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)等指标的含量^[9]。电导率相对其他水质指标而言,测定成本较低,易实现远程在线监测^[10]。今针对浙江省嘉兴市、湖州市长兴县、金华市金东区、绍兴市柯桥区开展农村生活污水水质调研工作,探究农村生活污水电导率与其他水质指标之间的响应关系,以期通过电导率指标的监测实现其他重要水质指标的远程在线估测。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选取长兴县、嘉兴市(包括海宁县县级市、秀洲区、南湖区、海盐县、嘉善县、港区6大区域)、金东区及柯桥区4个地区作为采样区,于2019年3—6月开展农村生活污水站点进出水中常见理化指标和离子含量的调研及检测工作。每个地区随机选择一定数量的农村生活污水处理站点采集其进出水,其中嘉兴市为50个站点,长兴县为48个站点,金东区为40个站点,柯桥区为30个站点。4个地区最终有效总采样点数为167个,无效采样点1个。

1.2 水样的采集与测定

在每个站点的进出水口分别采集水样500 mL,采样结束后,立即完成相关指标的测定,剩余水样置于冰箱中 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 冷冻保存,备用。

污水的电导率值采用雷磁 DDS-307 型电导率仪测定;TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP、COD 分别采用对应的哈希快速测定仪试剂盒测定; Cl^- 采用雷磁 PXSJ-226 型离子浓度计,配合 Cl^- 选择电极进行测定; Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 采用 ICP-AES 法测定。

1.3 数据处理

统计数据与作图采用 Microsoft Excel,数据相关性分析采用 SPSS19.0。

2 结果与讨论

2.1 主要导电离子种类及含量分析

对农村生活污水进出水中主要离子进行测定,测定均值见表1。由表1可知,农村生活污水中主要的导电离子有 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 等阴离子和 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等阳离子^[11]。进一步分析发现,进水中主要阴离子和阳离子的总浓度分别为 2.09 mmol/L 和 5.38 mmol/L,出水中主要阴离

子和阳离子的总浓度分别为 2.45 mmol/L 和 4.62 mmol/L,进出水中的离子浓度均在 7 mmol/L 左右,说明农村生活污水具备基本的导电条件。

表1 主要离子测定均值

Table 1 Average concentration of main ions

指标		进水 $c/$ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 $c/$ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)
阴离子	Cl^-	1.17	1.16
	NO_3^-	0.35	0.72
	SO_4^{2-}	0.43	0.44
	PO_4^{3-}	0.14	0.13
	总浓度	2.09	2.45
阳离子	NH_4^+	1.89	1.13
	Na^+	2.01	2.02
	K^+	0.40	0.37
	Ca^{2+}	1.08	1.10
	总浓度	5.38	4.62

2.2 水质指标相关性的总体分析

针对电导率、TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP、COD、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等9项指标,分析各项指标之间的 Pearson 相关性,从而探究不同指标之间相关关系的密切程度及相关方向。结果表明,除 Ca^{2+} 外,农村生活污水进出水的电导率与其他指标之间普遍存在极显著相关性。进出水中电导率值分别与 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 Cl^- 及 Na^+ 呈极显著相关($P < 0.01$),且相关系数均 > 0.7 ;电导率值分别与 TP、COD 及 K^+ 呈极显著相关($P < 0.01$),相关系数相对较低。这是由于电导率值的大小主要与离子浓度相关,污水中的 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 Na^+ 的浓度相对较高,对于电导率的影响也会较为显著,相关系数较高; PO_4^{3-} 、 K^+ 的浓度相对较低,而 COD 以有机化合物为主,其可导电离子组分含量较少,故 TP、COD 及 K^+ 对于电导率的影响也会相对较小^[12],相关系数较低。

进出水中的 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 3 个指标两两间均呈极显著相关,其中 TN 与 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 呈极显著相关,相关系数 > 0.7 ($P < 0.01$),这主要是由于在农村生活污水中, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 是 TN 的重要组成部分。TN 与 TP 呈极显著相关,相关系数 > 0.8 ($P < 0.01$),这可能是由于污水中 TN 和 TP 主要来源相同。农村生活污水中的 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 的主要来源均为人们日常生活所产生的厕所污水、洗涤污水等,具有一定的同源性^[13],且浙江地区人们的生活

习惯类似,故污水中 TN、NH₃-N、TP 的含量、占比也较为接近,三者之间会存在显著的相关关系^[14]。

进出水中的 Cl⁻ 与 Na⁺ 呈极显著相关,相关系数 > 0.8 ($P < 0.01$),这是由于污水中的 Cl⁻ 与 Na⁺ 一部分本身就存在于人们日常的饮用水水源中,另一部分主要来源于厨房污水和厕所污水,具有一定的同源性^[15]。进出水中的 Ca²⁺ 浓度均与 TN、NH₃-N、TP 及 COD 呈负相关关系,与 COD 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。这主要是由于污水中的 Ca²⁺ 大部分直接来源于日常饮用水水源,人们在日常生活中基本不产生包含 Ca²⁺ 的生活污水,当污水处理站点出现管网破裂地下水渗入等问题时,收集的农村生活污水被稀释,使得污水中的 TN、NH₃-N、TP 和 COD 浓度降低,Ca²⁺ 浓度反而有所增加。

2.3 农村生活污水电导率值的通径分析

根据上述水质指标的相关性分析,以进水电导率值为因变量,TN (X_1)、NH₃-N (X_2)、TP (X_3)、COD (X_4)、Cl⁻ (X_5)、Na⁺ (X_6)、K⁺ (X_7)、Ca²⁺

(X_8) 8 个指标为自变量,建立多元线性回归方程,得到进出水回归方程的决定系数 R^2 分别为 0.878 和 0.880,线性关系显著性检验 F 值分别为 137.35 和 140.37 ($P < 0.01$)。这表明农村生活污水的进出水电导率值均与上述 8 个指标之间存在极显著的线性关系,可以进行相关通径分析。以电导率值 (y) 为因变量,上述 8 个指标为自变量进行通径分析,并在剔除直接影响不显著的自变量基础上,探究多个自变量与因变量电导率之间的真实关系。

2.3.1 进水通径分析

通径分析得到各项指标对进水电导率的影响,见表 2。由表 2 可知,直接通径系数 $P(X_1)$ 、 $P(X_2)$ 、 $P(X_3)$ 、 $P(X_5)$ 、 $P(X_6)$ 、 $P(X_8)$ 均 < 0.01,即 TN、NH₃-N、TP、Cl⁻、Na⁺ 及 Ca²⁺ 是影响电导率的主要指标^[16]。其中,TN 的直接通径系数最高(0.472 0),其次分别是 NH₃-N(0.273 1)、Na⁺(0.269 5)、TP (-0.192 2)、Cl⁻(0.156 3)、Ca²⁺(0.150 6),这说明 TN 是影响进水电导率值的重要指标。

表 2 各项指标对进水电导率的影响

Table 2 Influence of various indexes on influent conductivity

自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数									
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	合计	
X_1	0.732	0.472 0										
X_2	0.779	0.273 1	0.341 3									
X_3	0.538	-0.192 2	0.393 7	0.135 7								
X_4	0.428	0.032 3	0.357 3	0.127 5	-0.150 9							
X_5	0.800	0.156 3	0.266 2	0.161 7	-0.092 1	0.010 1						
X_6	0.756	0.269 5	0.181 7	0.132 7	-0.058 4	0.004 3	0.126 5			0.019 2		
X_7	0.385	0.050 0	0.144 0	0.062 3	-0.053 1	0.008 5	0.046 1	0.103 5			0.031 0	
X_8	0.279	0.150 6	-0.036 3	-0.019 4	0.015 8	-0.008 5	0.059 1	0.130 2	0.010 3			0.151 2

由于 COD、K⁺ 这两个指标的直接通径系数过小,直接影响不显著,故予以剔除,得到进水电导率的多元线性回归方程 $y = 112.301 + 4.86X_1 + 3.618X_2 - 13.924X_3 + 2.631X_5 + 3.901X_6 + 2.405X_8$, $R^2 = 0.875$,表明 TN、NH₃-N、TP、Cl⁻、Na⁺ 及 Ca²⁺ 是影响农村生活污水进水电导率的主要指标。该多元线性回归方程能够在一定程度上反映各项指标与电导率之间存在一定相关性,故能够通过这 6 个指标反映农村生活污水进水电导率的大小。

2.3.2 出水通径分析

通径分析得到各项指标对出水电导率的影响,

结果表明,直接通径系数 $P(X_1)$ 、 $P(X_2)$ 、 $P(X_5)$ 、 $P(X_6)$ 、 $P(X_7)$ 均 < 0.01,即 TN、NH₃-N、Cl⁻、Na⁺ 及 K⁺ 是影响电导率的主要指标。其中,TN 直接通径系数高达 0.455 9,对电导率的直接影响最大,其次是 Na⁺(0.289 6)、Cl⁻(0.213 4)、NH₃-N(0.114 1)、K⁺(0.108 0),且均呈正相关。通径系数 $P(X_3)$ 、 $P(X_4)$ 、 $P(X_8)$ > 0.05,未达到显著性水平。另外,NH₃-N 间接通径系数远大于其直接通径系数,其主要通过 TN 间接作用于电导率,而 TP 和 COD 对于电导率的直接作用很小,同样是通过 TN 间接作用影响电导率,这说明 TN 也是影

响出水电导率的重要指标。剔除直接影响不显著的自变量 TP(X_3)、COD(X_4)和 Ca^{2+} (X_8),得到出水电导率的多元线性回归方程 $y = 197.627 + 5.144X_1 + 1.362X_2 + 3.839X_5 + 4.078X_6 + 2.585X_7, R^2 = 0.879$,表明能够通过 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 Cl^- 、 Na^+ 及 K^+ 这 5 个指标反映农村生活污水出水电导率的大小。

2.4 农村生活污水进出水中 TN 含量的拟合

综上所述,农村生活污水处理设施进出水中的 TN 含量均与电导率值呈极显著相关($P < 0.01$),通径分析结果也验证了 TN 是对进出水电导率值直接影响最大的重要指标,理论上,通过监测站点进出水的电导率值能够在一定程度上估算出污水中的 TN 含量。从调研的 167 个有效站点中随机选取 80 个站点,测定其电导率和 TN 含量,进行电导率 - TN 的拟合分析,得到相应的拟合方程,再随机选取另外 80 个站点,测定其电导率和 TN 含量,用于验证分析。

进水电导率 - TN 含量的拟合方程为 $y = 4 \times 10^{-5}x^2 + 3.4 \times 10^{-3}x + 9.292, R^2 = 0.7172$;出水电导率 - TN 含量的拟合方程为 $y = 5 \times 10^{-5}x^2 - 0.001x + 2.7427, R^2 = 0.8476$ 。

利用进出水拟合方程分别计算出验证点位的拟合 TN 值,将拟合值 y 和实际值 x 做线性回归分析,得到线性方程 $y = 0.5407x + 16.653, R^2 = 0.6826$ 和 $y = 0.6868x + 6.3688, R^2 = 0.785$,表明实际 TN 值与拟合 TN 值具有一定的线性关系。在进水中,两者相关系数高达 0.6826,且在 0.01 水平上呈显著相关;在出水中,两者相关系数高达 0.785,也在 0.01 水平上呈显著相关。这说明在一定程度上,通过单一电导率指标能够反映污水中的 TN 含量。

3 结语

农村生活污水的电导率、TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 等指标间普遍存在极显著相关性。通径分析结果表明:影响进水电导率的主要指标是 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP、 Cl^- 、 Na^+ 及 Ca^{2+} ,影响出水电导率的主要指标是 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 Cl^- 、 Na^+ 及 K^+ 。其中,TN 在进出水中的直接通径系数均最高,是影响进出水电导率的重要指标。进出水电导率 - TN 含量的拟合和验证结果显示:在进出水中,实际 TN 值与拟合 TN 值相关系数分别为 0.6826 和 0.785,通过电导率在

一定程度上可反映污水中的 TN 含量。该研究结果可为今后农村生活污水 TN 含量的远程在线监测提供新思路和新方法,通过在农村生活污水处理设施上安装电导率仪,实现水质指标的远程在线估测,具有一定可行性。

[参考文献]

- [1] 张秀娥. 浅析我国农村生活污水排水现状及对策[J]. 低碳世界, 2017(6): 14 - 15.
- [2] 卜岩枫, 许月明, 卓明, 等. 浙江省农村生活污水处理技术应用现状及处理效果分析[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(6): 106 - 110.
- [3] 徐志荣, 叶红玉, 卓明, 等. 浙江省农村生活污水处理现状及其对策[J]. 生态与农村环境学报, 2015(4): 33 - 37.
- [4] 刘雅文, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水尾水灌溉对麦秸还田水稻幼苗及土壤环境的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2739 - 2745.
- [5] 陆泗进, 何立环. 浅谈我国农村环境监测[J]. 环境监测管理和技术, 2013, 25(5): 1 - 3.
- [6] 冯立波, 左国超, 杨存基, 等. 基于物联网的农村污水监测系统设计研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 670 - 676.
- [7] 傅其凤, 安旭朝, 陈国庆. 工业园区污水水质和流量在线监测系统的应用[J]. 给水排水, 2015(11): 100 - 102.
- [8] 郭俊元, 周禹伶, 江世林, 等. 多级土壤渗滤系统处理农村生活污水[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 182 - 192.
- [9] ZHANG Y, DUAN H P, SUN A L, et al. Rural sewage treatment techniques mode and purifying effect of nitrogen and phosphorus in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(1): 172 - 178.
- [10] 曹舟艳. 电导率加和性质及其在降水监测数据处理中的应用[J]. 环境监测管理和技术, 2014, 26(5): 64 - 66.
- [11] 白保勋. 城镇生活污水杨树林地慢速渗滤生态处理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [12] LI L, WANG Q J. Hydraulic loading on test of nitrogen and phosphorus removal from rural sewage by subsurface constructed wetlands-ponds composite system[J]. Advanced Materials Research, 2013, 779/780: 1347 - 1351.
- [13] 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(6): 39 - 43.
- [14] ZHANG Y F, ZHU G C, LU X W. Features and performance of biological and ecological treatment combination process for rural sanitary sewage[J]. Advanced Materials Research, 2011, 356/357/358/359/360: 1773 - 1777.
- [15] 赵军营. 源分离农村卫生厕所冲水灌溉利用技术研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2014.
- [16] YAN L, AZHAR R, HONGJIE W, et al. Contribution of biotic and abiotic factors in the natural attenuation of sulfamethoxazole: A path analysis approach[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1217 - 1226.