



北方地区典型城郊型村镇生活污水排放特征

张傲醒^{1,2}, 黄锦楼^{1,2,✉}, 姜姍^{1,2}, 李静³

1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中科绿洲(北京)生态信息技术有限公司, 北京 100096

摘要 近年来, 随着城镇化的快速发展, 城郊型村镇作为一类典型的农村地区, 由于较普通农村地区发展更加迅速、人口分布更加集中、产业类型更加多样, 正面临日益严重的环境问题, 逐渐成为农村污水治理研究的重点。本研究区以北方地区黄河流域下的一个典型城郊型村镇为研究对象, 探讨研究区农村生活污水的排污特征, 补充该类典型农村地区生活污水治理的基础数据, 帮助更科学的开展城郊型村镇污水治理工作。结果表明, 研究区排放的生活污水水温全年基本保持在 10 °C 以上, 非雨季人均每日生活污水排放量为 91~136 L·(人·d)⁻¹, 污水总排放量为 150~600 m³·d⁻¹, TN、NH₄⁺-N、TP、COD 4 项污染物的平均浓度分别为 36.4、34.0、2.5 和 131.0 mg·L⁻¹, 其作为城郊型村镇具有产生污水水量较大、污染物浓度较低且波动范围较广的特点, 适用于单一生态或生物与生态相结合的生活污水处理技术。

关键词 城郊型村镇; 农村生活污水; 排放特征

近年来, 我国农村生活污水治理作为农村人居环境整治的重要内容, 越发受到人们的重视, 《农村人居环境整治提升五年行动方案(2021—2025年)》明确指出了对提高农村生活污水治理率、推进农村厕所革命的要求。其中, 探讨污水排放特征是农村生活污水治理的重要一环, 农村生活污水排放特征是指农村居民生活产生的污水排入环境中时水温、水量和水质等特点, 其揭示了农村地区排放污水的污染物负荷情况和变化规律, 帮助农村地区更加科学地选用和设计适宜的污水治理工艺模式和处理设施规模, 也为农村生活污水的治理规划提供基础数据^[1-3]。目前, 关于农村生活污水排污特征的研究, 多集中于太湖、巢湖以及三峡等重要流域周围的普通农村地区, 且主要以农户为研究对象进行抽查调研, 如程方奎等^[4]入户调研了太湖流域的 3 个样本家庭, 采用源分类的方法探讨了污水中污染物负荷的特点, 何源等^[5]以巢湖地区典型农户家庭为调研对象, 研究了每户产生黑水和灰水水量以及产污系数, 彭绪亚等^[6]探讨了三峡库区 18 户典型农户的污水产生量与污染物负荷情况, 并研究了地域、收入水平和季节等因素对其的影响。

城郊型村镇, 是指位于城乡结合部的村镇地区^[3], 处于城乡要素相互融合的过渡性地带^[7]。近年来, 随着城镇化的快速发展, 越来越多农村地区被纳入城市建设的规划范围, 城乡结合部的面积不断扩大, 城郊型村镇作为一类典型的农村地区也逐渐引起人们的关注^[3,7-8]。不同于普通农村地区, 城郊型村镇具有较高密度的人群和相对发达的经济, 境内居民生活水平普遍更高且产业类型更为多样^[9-10], 然而, 同时城郊型村镇也面临滞后的基础设施建设无法与日益增加的污染排放相匹配的现状, 农户改厕、污水收集管网和处理设施建设等工作进展较为缓慢, 使得城郊型村镇的环境污染问题较为突出^[11-12]。目前, 城郊型村镇的生活污水治理多套用普通农村地区或城市的治理模式, 针对该典型农村地区生活污水排放特征的研究也较为薄弱^[3,13]。因此, 本研究以北方地区黄河流域下的一个典型城郊型村镇——山西省晋城市巴公镇为研究对象, 探讨了该镇区内集中收集的农村生活污水排入环境中时的水温、水量和水质特点, 了解该城郊型村镇生活污水排放特征和污染负荷情况, 补充该类典型农村地区生活污水治理的基础数据, 从而帮助更科学的选择城郊型村镇污水治理工艺模式, 推进后续农村生活污水治理项目。

收稿日期: 2023-07-19; 录用日期: 2023-10-25

基金项目: 晋城市高平市农村生活污水处置与资源化利用项目(20210682); 晋城市沁水县农村生活污水处置与资源化利用项目(20210614)

第一作者: 张傲醒(1998—), 女, 硕士研究生, zjx18256880209@163.com; ✉通信作者: 黄锦楼(1978—), 男, 博士, 副研究员, jlhuang@rcees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省晋城市巴公镇位于山西省东南部, 全镇辖 38 个行政村、2 个社区, 总面积 112 km², 人口 6.2×10⁴ 人; 地貌以山地丘陵为主, 年平均气温约 10 ℃, 年降水量 618.3 mm, 四季分明, 雨热同期; 境内主要河道有巴公南河、巴公北河等 8 条^[14]。巴公镇作为典型城郊型村镇, 境内煤、铁资源丰富, 社会经济发展和居民生活水平均较普通农村地区更高, 居民住宅楼分布集中, 地面硬化比例较高, 基础设施建设较为完善。另外, 境内“改水、改厕、改污”工作同步进行中, 自来水供应基本实现全覆盖, 农户厕所改造和污水管道铺设工作还在持续推进, 管道收集方式采用雨污合流制, 目前建成区已有污水处理厂 2 座。

本研究依据巴公镇生活污水治理工作的推进情况, 以巴公一村、二村、三村和四村的部分区域为研究对象, 具体覆盖范围由北到南依次为巴原街、科工贸大街和南环街两侧的居民居住区 (图 1), 居民产生的生活污水通过地理式污水管道集中收集, 统一汇入南环街东南侧排污口, 经过简单的土壤渗滤处理后排入荒地。值得注意的是, 由于研究区内持续进行的农户厕所改造和污水管道铺设工作, 笔者探讨研究区排污特征主要分为 3 个阶段: 1) 2021 年 10 月—2022 年 7 月, 管道扩建前期, 排污口主要收集了科工贸大街两侧的居民生活污水; 2) 2022 年 8 月—2022 年 11 月, 管道扩建后期, 污水管道新接入南环街和巴原街两侧的居民生活污水, 排污口污水水量增大; 3) 2022 年 12 月—2023 年 3 月, 集中改厕后期, 研究区内改厕率提高, 排放污水中污染物浓度提高。

根据实地调研, 截至 2023 年 3 月, 巴公镇研究区总面积约 0.88 km², 总人口约 5 000 人, 研究区内除一般居民住宅楼外, 还有商场 1 座、小型餐馆约 60 个、洗浴中心 2 个、住宿学校 2 所、医院 1 座以及若干其他商铺, 根据其污水产生的特点, 污水来源主要可分为普通居民生活用水、餐饮行业用水、洗浴中心用水和降水 4 种类型。其中, 1) 普通居民生活用水, 包括一般居民生活用水、住校学生用水和普通商铺用水, 污水收集方式分为 2 种: 已完成厕所改造的农户, 居民生活产生的厕所污水先收集至化粪池中沉淀发酵, 上清液再与居民洗漱、洗浴和餐厨污水共同汇入污水管道; 未完成厕所改造的农户, 居民产生的生活污水只有灰水进入污水管道。2) 餐饮行业用水, 包括研究区内 60 个餐馆用水和 2 所学校食堂用水, 产生污水首先经过隔油池初步处理, 并过滤食物残渣后进入污水管道, 排放量约 50~80 m³·d⁻¹。3) 洗浴中心用水, 指研究区内 2 个洗浴中心的用水, 主要分为淋浴用水和浴池用水两方面, 产生污水直接排入管道, 排放量约 5~15 m³·d⁻¹。4) 降水, 主要集中在每年雨季 6 月—9 月, 直接汇入污水管道随居民生活污水共同排出。经过初步测算, 巴公镇研究区在非雨季期间, 排放生活污水水量约 80%~90% 来自普通居民生活用水, 5%~10% 来自餐饮行业用水, 1%~5% 来自洗浴中心用水。

1.2 样品采集

采样点设置于研究区内南环街东南侧的排污口处, 从 2021 年 10 月—2023 年 3 月, 持续一年半监测排污口水温、水量和水质的基本情况, 监测频率为每月 2~3 次, 具体采样日期避开降水天气, 尽量降低非雨季节降水对研究区污水排污特征的影响。水温检测采用一般的水温计测量, 水量检测采用旋浆式流速仪结合管道污水断面面积进行估算, 水质检测通过实地采样后带回实验室分析测定。

1.3 检测分析

水质检测, 选用聚丙烯无菌采样瓶采集水样, 将水样于 4 ℃ 的条件下低温保存, 并于采样后的第 2 天进行水质检测。综合山西省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 14/726-2019) 和山西省《污水综合排放标准》(DB 14/1928-2019), 研究选用 TN、NH₄⁺-N、TP、COD 作为水质检测指标, TN 采用碱性



图 1 巴公镇研究区污水收集示意图

Fig. 1 Sewage collection diagrammatic map of Bagong study area

过硫酸钾消解紫外分光光度法测定 (HJ 636-2012), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定 (HJ 535-2009), TP 采用钼酸铵分光光度法测定 (GB 11893-1989), COD 采用重铬酸盐法测定 (HJ 828-2017)。

2 结果与分析

2.1 巴公镇研究区生活污水水温分析

2021 年 10 月—2023 年 3 月, 巴公镇研究区排放的污水月平均水温和月平均气温变化如图 2 所示。根据巴公镇月平均气温的变化情况, 可将当地的四季时段划分为春季 3—5 月、夏季 6—8 月、秋季 9—11 月和冬季 12 月—翌年 2 月, 其中 2022 年和 2023 年的 1 月份月平均气温 (分别为 -0.5 和 -1.0 $^{\circ}\text{C}$) 最低, 2022 年 8 月份月平均气温 (24.5 $^{\circ}\text{C}$) 最高。同时, 巴公镇研究区排放的生活污水水温与当地气温呈现相同的变化趋势, 污水在冬季 12 月—翌年 2 月的平均温度较低, 夏季 6 月—8 月的平均温度较高, 其中 2022 年和 2023 年 1 月的平均水温 (分别为 10.1 和 10.5 $^{\circ}\text{C}$) 最低, 2022 年 7 月平均水温 (22.5 $^{\circ}\text{C}$) 最高。污水水温是研究农村生活污水排放特征的重要内容之一, 其作为控制微生物生长代谢的重要参数, 很大程度上影响了后续采取农村生活污水处理工艺的运行效果^[15]。一般情况下污水处理中微生物反应的适宜水温在 $15\sim 35$ $^{\circ}\text{C}$ ^[16], 该范围内温度越高、微生物活性越高, 处理效果越好, 反之温度越低、处理效果越差, 而当污水水温降至 5 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 生物脱氮除磷效果基本丧失^[17]。本研究中, 巴公镇研究区排放的生活污水水温全年基本保持在 10 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 且每年 5 月—10 月期间, 污水水温升至 $15\sim 25$ $^{\circ}\text{C}$, 表明巴公镇研究区排放污水水温全年保持在较高水平^[11], 保证了农村生活污水处理中微生物的活性以及冬季低温条件下的城郊型村镇生活污水处理工艺的除污效果^[18]。

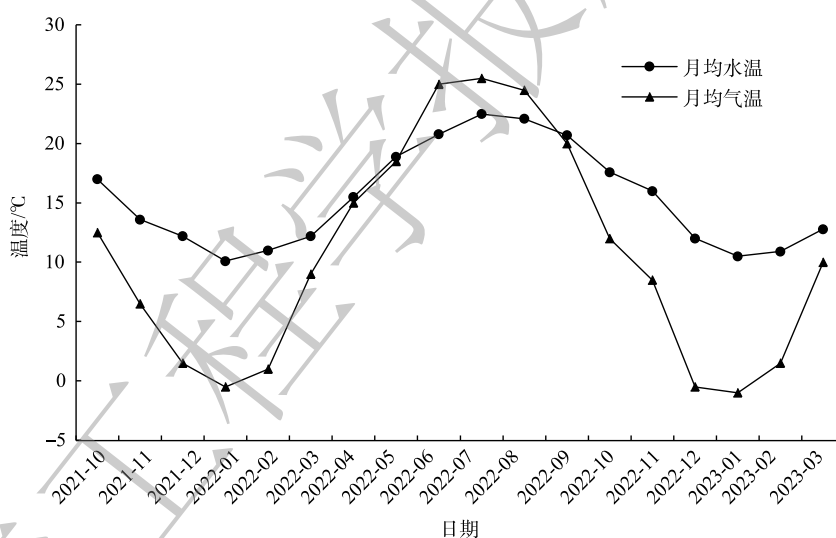


图 2 污水水温和环境气温随时间的变化

Fig. 2 Variation of sewage and atmospheric temperature with time

巴公镇研究区排放污水水温的影响因素可以分为自然因素和人为因素两个方面。自然因素主要指环境温度对污水水温的影响, 如图 2 所示, 巴公镇区污水月平均水温和月平均气温随时间的变化趋势基本一致, 双变量 Pearson 检验结果表明, 研究区气温和产生的污水水温呈显著正相关关系 ($R=0.955$, $P<0.01$), 进一步回归表明, 巴公镇研究区排放污水水温的变化速率约为环境温度变化速率的 0.4 倍, 揭示了巴公镇研究区管道收集排放的污水水温与环境气温之间的变化关系。人为因素主要包括居民生活习惯和人为基础设施的影响, 根据实地调研, 巴公镇作为城郊型村镇, 经济发展迅速, 居民生活水平较高, 供热基础设施建设较为完善, 热水器使用普遍, 因此冬季用水温度较高, 使得产生的污水水温也较高^[19]; 另外, 巴公镇研究区生活污水采用的地埋式集中污水管道的收集方法, 对污水也有很好的保温效果^[20], 使得巴公镇研究区排污口的生活污水在冬季也能基本保持在 10 $^{\circ}\text{C}$ 以上。

2.2 巴公镇研究区生活污水水量分析

1) 污水水量整体特征分析。2021年10月—2023年3月,巴公镇研究区污水排放量变化为 $150\sim 600\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,波动范围较大。由于受到2022年8月人为管道扩建和2022年12月农户集中改厕的影响,研究区污水水量特征分析分为3个时期进行探讨,分别为2021年10月—2022年7月管道扩建前期、2022年8月—2022年11月管道扩建后期和2022年12月—2023年3月集中改厕后期。图3为巴公镇研究区月均污水排放量和月总降水量的年变化图。2021年10月—2022年7月,污水管道扩建前,排放污水主要来自研究区内科工贸大街两侧的居民生活污水,污水排放量为 $150\sim 500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,其中2021年10月—2022年2月受冬季居民用水习惯的影响,冬季气温下降、居民用水量减少^[21-22],研究区污水水量呈现逐渐降低的趋势,2月份污水平均排放量只有 $150\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 左右,后续随气温回暖、污水水量逐渐回升;2022年3月的污水水量,对比2022年2月和4月呈现较为明显的升高趋势(水量提高了 $30\sim 80\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$),根据实地调研记录,分析原因为疫情封控影响,研究区内采取停课、停工、停产的措施,所有农户居家隔离、不得外出,导致3月居民生活用水明显增加,污水排放量也呈现明显升高趋势^[23];2022年6月开始,巴公镇研究区进入雨季,雨污合流的污水收集模式,使得降水成为雨季污水水量的主要影响因素^[24],图3表明2022年6月和7月,研究区污水平均排放量随当月降水量迅速上升,从非雨季的 $200\sim 300\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 升高至接近 $500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。2022年8月—2022年11月,管道扩建后,新进巴原街和南环街两侧的居民生活污水,使得污水排放量进一步提高,排除2022年8月和9月降水的主要影响,污水水量整体从管道扩建前的 $200\sim 300\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 升高至管道扩建后的 $400\sim 500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。2022年12月—2023年3月,集中改厕后,巴公镇研究区内改厕率提升,更多村户产生的黑水收入污水管道,水量进一步升高,非雨季污水水量提升至 $500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 以上。以上研究结果表明,巴公镇研究区污水排放量的影响因素主要包括自然因素和人为因素两个方面,自然因素是指雨季降水使得研究区污水排放量明显升高^[3,11];人为因素主要包括居民生活习惯、疫情管控、污水管道扩建和农户改厕的影响,其中污水管道建设和农户改厕作为巴公镇基础设施建设和污水治理工作的重要内容之一,仍在持续推进中,成为非雨季影响研究区污水排放量的主要因素。

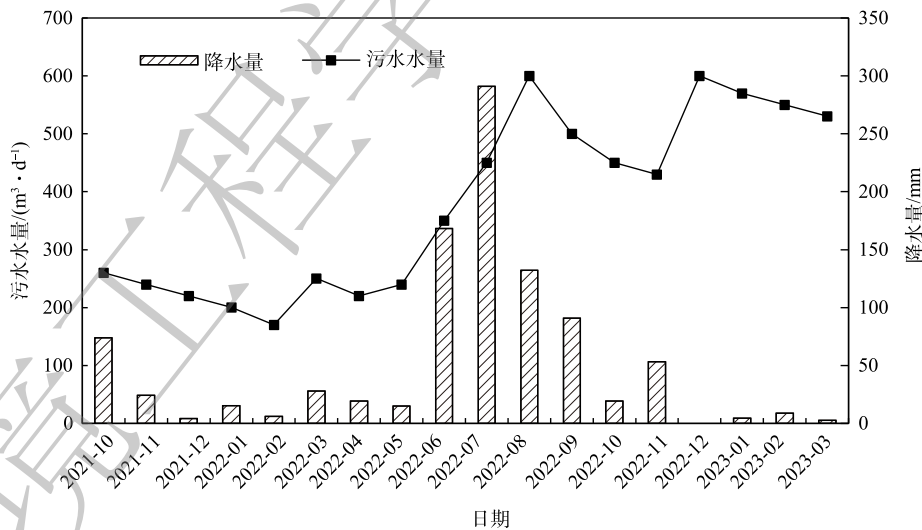


图3 污水水量与降水量随时间的变化

Fig. 3 Variation of sewage quantity and precipitation with time

根据前期调研,2021年10月—2022年7月,污水管道扩建前,巴公镇研究区覆盖约2200人;2022年8月—2023年3月,污水管道扩建后,研究区覆盖人数提升至约5000人。根据监测所得巴公镇研究区污水排放量数据,估算当地人均每日生活污水排放量,结果表明:雨季期间,巴公镇研究区内人均每日生活污水排放量约 $120\sim 227\text{ L}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$;非雨季期间,巴公镇研究区内人均每日生活污水排放量约 $91\sim 136\text{ L}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$ 。按照《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017),城镇生活污水排放系数为0.7~0.9,由于本研究区内地表硬化率高、污水收集设施较为完善,因此,一般取生活污水排放系数为0.8^[3],从而计算得

出巴公镇研究区非雨季人均每日用水量为 $113\sim 170\text{ L}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$ 。对比普通农村地区，晋城市巴公镇下的来村非雨季人均每日生活污水排放量只有约 $41\text{ L}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$ ，隔壁山西省运城市下农村地区居民日用水量为 $60\sim 100\text{ L}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$ [25]。以上结果表明巴公镇研究区作为经济条件较好和居民生活水平较高的城郊型村镇，人均每日用水量和污水排放量均较普通农村地区水平更高。

2) 降水对污水水量的影响分析。巴公镇降水量主要集中在每年的夏季 6—9 月，雨热同期，2022 年 6 月进入雨季，巴公镇研究区排放污水水量随降水的进行呈现明显上升趋势，污水排放量从非雨季的 $200\sim 300\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 升高至雨季 $300\sim 500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ，提升近 1 倍。研究区内雨污合流的污水收集模式，使得污水排放量受到较为明显的气候影响，雨季期间随降雨量增大出现明显提升，旱季期间又恢复正常水平 [11]。进一步探讨巴公镇研究区月降水量与管道污水排放量的关系，对管道扩建前 2021 年 10 月—2022 年 7 月的污水水量和降水量进行相关性分析，结果表明相关系数为 $0.972(P<0.01)$ ，表明巴公镇研究区污水管道排放量与降水量呈显著正相关关系，且回归分析得出：月均污水水量 $=205.28+0.847\times$ 月总降水量 (图 4(a))。2022 年 8 月—2023 年 3 月，除降水量外，研究区污水排放量进一步受到污水管道扩建和农户集中改厕的明显影响，在 2022 年 8 月和 2022 年 12 月出现 2 个峰值，降水量与管道污水排放量之间的关系发生改变；综合 2 次基础设施建设的影响，进一步分析巴公镇研究区月降水量与管道污水排放量的关系，结果表明研究区月均污水水量依然与月总降水量的呈显著正相关关系 ($R=0.930, P<0.01$)，且回归分析得出：月均污水水量 $=563.32+1.678\times$ 月总降水量 (图 4(b))，表明随着污水管道扩建和改厕工作的推进、研究区污水水量随降水量的变化幅度增大。本研究结果初步揭示了巴公镇研究区内，合流制管道收集的污水排放量与当地降水量之间的关系，定量地说明降水对合流制污水管道排放量的影响，有助于更科学预测巴公镇研究区内管道排放的污水水量负荷，设置合适的污水处理工艺与处理规模。

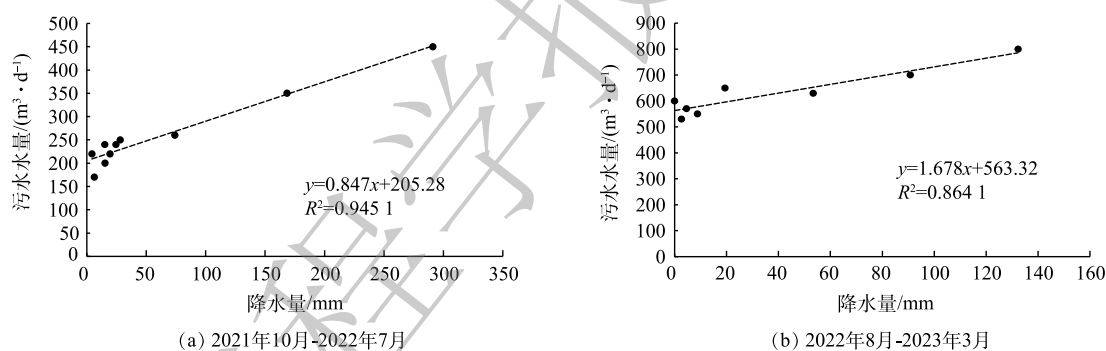


图 4 污水水量与降水量的回归分析

Fig. 4 Linear regression analysis of sewage quantity and precipitation

2.3 巴公镇研究区生活污水水质分析

1) 污水污染物浓度整体特征分析。巴公镇研究区污水中污染物的浓度如表 1 所示，经过 2021 年 10 月—2023 年 3 月一年半的水质检测分析，巴公镇研究区排放的污水中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、耗氧有机污染物 (以 COD 计) 4 项污染物的平均浓度分别为 36.4 、 34.0 、 2.5 和 $131.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，且各项指标的波动幅度较大，变化范围均在 5 倍以上，COD 值的波动范围甚至达到 10 倍以上。有研究表明，华北地区一般农户产生污水的水质情况为： $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 $20.0\sim 90.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，TP 浓度 $2.0\sim 6.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，COD 值为 $200.0\sim 450.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [26]，城市生活污水处理厂的进水浓度更是达到了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 $20.0\sim 146.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，TP 浓度 $2.6\sim 24.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，COD 值 $100.0\sim 1570.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [4]，对比本研究结果，巴公镇研究区污水中各项污染物浓度均处于较低水平。分析原因，一般情况下农村生活污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度代表了人畜排泄物的情况， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度越高、污水中黑水占比越高 [27]，然而本研究中，截至 2023 年 3 月巴公镇研究区的改厕率仅为 50% 左右，许多村民依然使用旱厕，导致污水管道中黑水收集较少，因此污水中 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低；

表 1 污水中污染物浓度

Table 1 The concentration of pollutants in sewage $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

统计结果	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	COD
范围	10.6~60.1	10.0~56.5	0.7~4.4	39.0~469.0
均值	36.4	34.0	2.5	131.0

污水中的 P 主要来源于日常用水中洗涤剂的使用,特别是厨房洗碗水和洗衣用水^[28],本研究中 TP 的浓度为 0.7~4.4 mg·L⁻¹,说明巴公镇研究区内居民对于洗涤剂的使用量较低;生活污水中耗氧有机污染物主要来源依次为厕所黑水和厨房用水两方面^[29],因此,研究区较低的改厕率也影响了污水中的 COD 值;另外,巴公镇研究区采用的雨污合流的污水管道收集模式,以及仍在不断推进的改厕工作,使得本研究中 TN、NH₄⁺-N、TP、COD 4 项污染物浓度波动范围较大。

图 5 为巴公镇研究区排放污水中 TN、NH₄⁺-N、TP、COD 4 项污染物浓度随时间的变化情况。2021 年 10 月—2023 年 3 月分为管道扩建前、管道扩建后和集中改厕后 3 个时期。2021 年 10 月—2022 年 7 月,管道扩建前,研究区污水中 4 种污染物浓度整体均呈逐渐降低的趋势,其中 2021 年 10 月—2022 年 5 月非雨季期间,污染物浓度最高的时期为 2021 年 10 月—2021 年 12 月, TN 和 NH₄⁺-N 浓度保持在 40.0~50.0 mg·L⁻¹, TP 浓度和 COD 值达到 3.6 mg·L⁻¹ 和 171.9 mg·L⁻¹, 后续除 2022 年 3 月外, 4 项污染物浓度均呈现逐渐降低的趋势; 经过实地调研, 2022 年 3 月由于疫情影响, 巴公镇研究区实施全员封控、不得外出的措施, 导致期间居民生活用水量明显提高, 加上排放污水中黑水的比例增加, 使得污水中污染物浓度整体有所回升^[23]; 雨季 2022 年 6 月—7 月, TN、NH₄⁺-N、TP、COD 4 项污染物浓度受降水影响, 继续呈现逐渐降低的趋势, 管道扩建之前, 巴公镇研究区非雨季污水的污染物浓度为 TN 28.8~47.3 mg·L⁻¹、NH₄⁺-N 24.7~45.2 mg·L⁻¹、TP 1.6~3.6 mg·L⁻¹ 和 COD 93.5~171.9 mg·L⁻¹, 整体均高于雨季污水的污染物浓度 TN(25.0~29.0 mg·L⁻¹)、NH₄⁺-N(23.6~25.5 mg·L⁻¹)、TP(1.9~2.2 mg·L⁻¹) 和 COD(67.0~91.0 mg·L⁻¹), 这与袁晓燕等^[3] 和陈雪峰等^[30] 的研究结果一致, 雨热同期导致雨季期间居民生活用水增加, 以及大量降雨汇入管道对污水产生的稀释作用, 使得雨季污水中污染物浓度普遍低于非雨季^[31]。

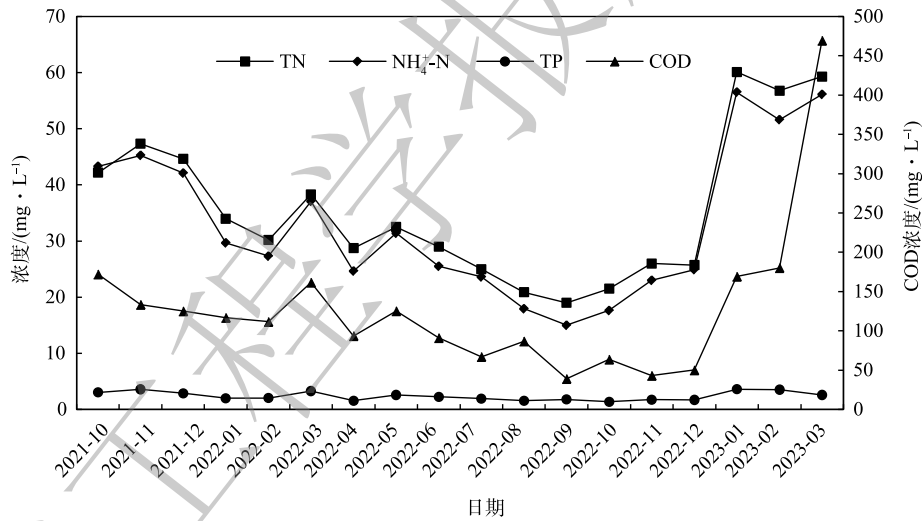


图 5 4 项污染物浓度随时间的变化

Fig. 5 Variation of pollutant concentration with time

2022 年 8 月—11 月, 管道扩建后, 新进改厕率较低的生活污水, 以及雨季降水的影响, 使得 TN、NH₄⁺-N、TP、COD 4 项污染物浓度进一步降低, 直至 10—11 月, 随着雨季结束, 污水中污染物浓度开始缓慢回升。2022 年 12 月—2023 年 3 月, 集中改厕后, 由于收集的居民生活污水中, 黑水占比进一步增加, 导致巴公镇研究区管道排放的污水中 TN、NH₄⁺-N 和 COD 值明显提高, 进一步证明居民生活污水中 TN、NH₄⁺-N 和耗氧有机污染物 (以 COD 计) 主要来源于厕所黑水^[27,29]。以上研究结果表明, 居民生活习惯、疫情管控、自然降水、管道扩建以及农户改厕均在一定程度上影响巴公镇研究区排放的污水污染物浓度, 其中人为的农户集中改厕工作是影响研究区污水水质的主要因素, 其作为巴公镇污水治理工作的重要内容之一, 目前仍在持续推进中。

2) 污水水质和水量的相关性分析。研究进一步将巴公镇研究区管道排放的污水水量和 TN、NH₄⁺-N、TP、COD 4 项污染物浓度进行相关性分析, 结果如表 2 和图 6 所示。在巴公镇研究区排放的生活污水中, TN、NH₄⁺-N 和 COD 值之间均呈显著正相关关系 ($P < 0.01$), 其中 TN 与 NH₄⁺-N 的相关性最强 ($R = 0.993$),

$P < 0.01$), 说明污水中 3 种污染物浓度总是具有相同的变化趋势, 共同升高或共同降低。这是由于生活污水中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和耗氧有机污染物 (以 COD 计) 的主要来源均为厕所用水^[27,29], 使得污染物浓度随着污水中黑水的占比发生相同的变化趋势, 这与陈茂霞等^[11]的研究结果一致; TP 浓度与 COD 值的相关性并不显著, 与 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度之间呈显著正相关关系 ($P < 0.01$), 浓度变化趋势相似。本研究中, 巴公镇研究区排放的污水水量与 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 COD 值之间的相关关系均不显著, 这与彭绪亚等^[6]的研究结果不同。一般情况下污水水量与污染物浓度之间具有负相关关系, 污水产生越多、污染物浓度越低, 而巴公镇研究区排放污水水量与污染物浓度的相关性并不显著, 分析原因可能为, 人为的管道扩建和农户改厕工作作为研究区污水水质和水量的主要影响因素, 在研究期间持续的推进, 打乱了两者之间的变化关系。以上研究结果表明, 巴公镇研究区排放的生活污水中, 污染物浓度受污水来源等因素的影响, TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 COD 4 项污染物之间具有较强的相关性, 变化趋势相近, 而水量与水质浓度之间相关关系并不显著。

3 讨论

目前, 我国常用农村生活污水处理工艺主要分为生物处理技术、生态处理技术和组合处理技术 3 种^[32], 生物处理技术指在好氧或厌氧条件下主要通过微生物对污水中的氮、磷和有机物进行降解吸收, 常用工艺包括厌氧-好氧法、生物接触氧化法、间歇式活性污泥法、膜生物反应器等^[26], 此类工艺通常占地面积较小、出水水质较好, 但抗冲击能力一般、建设和运行费用较高; 生态处理技术指通过植物、动物、微生物和土壤 (填料) 等因素协同作用, 过滤、分解和吸收污水中的污染物, 常用工艺包括化粪池、净化沼气池、稳定塘、生态滤池、人工湿地、土壤渗滤系统等^[33], 此类工艺对污水的抗冲击能力较高、建设和运行费用较低, 但通常占地面积较大、出水水质不太稳定; 组合处理技术指将生物和生态处理技术进行工艺组合, 以提高处理污水能力, 其中生物+生态处理技术模式使用最多^[32]。另外, 我国对于农村生活污水的回用研究越发重视, 2018 年发布《关于加快制定地方农村生活污水处理排放标准的通知》中鼓励采用生态处理工艺、加强污水回收利用, 生活污水中氮、磷元素可作为肥料用于农田灌溉^[34]。因此, 探讨农村生活污水的治理, 需要综合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 的一级 A 标准和《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021), 将污水的达标排放和资源化回用进行结合, 尽量减少资源浪费。

本研究中, 巴公镇作为典型城郊型村镇, 研究区排放的污水水温全年保持在 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 非雨季人均每日生活污水排放量约 $91\sim 136\text{ L}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$, 较普通农村地区农户用水量更大, 研究区生活污水总排放量为 $150\sim 600\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 污染物浓度为 $\text{TN}(10.6\sim 60.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}(10.0\sim 56.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 、 $\text{TP}(0.7\sim 4.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 和 $\text{COD}(39.0\sim 469.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1})$, 境内采取的合流制污水管道收集模式以及尚未完成的管道扩建和农户改厕工作, 使得巴公镇研究区产生的总污水水量较普通农村地区水平更高, 而污染物浓度整体较普通农村地区更低, 可生化性一般, 且整体水量水质变化范围较大。因此, 巴公镇研究区的生活污水处理适用于单一生态或生物与

表 2 污水水质和水量 Pearson 相关系数表

Table 2 Pearson correlation test results of pollutant concentration and sewage quantity

指标	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	COD	污水水量
TN	1				
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.993**	1			
TP	0.845**	0.865**	1		
COD	0.755**	0.754**	0.451	1	
污水水量	0.032	0.007	-0.133	0.081	1

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

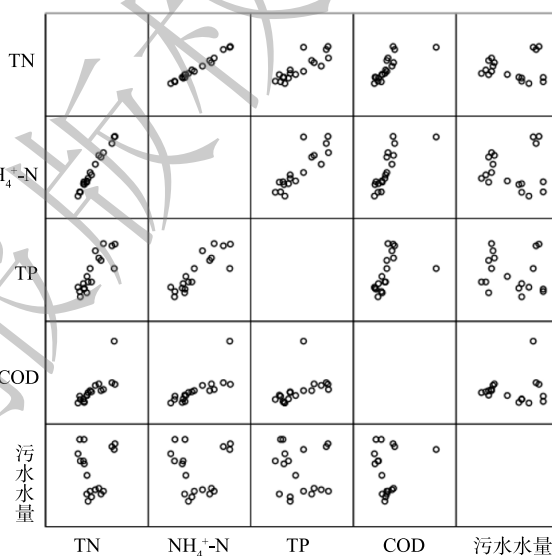


图 6 污水水质和水量散点图矩阵

Fig. 6 The matrix scatter diagram of pollutant concentration and sewage quantity

生态相结合的处理技术, 需要选择对于污水水量和水质波动的抗冲击能力较强、占地面积较小以及建设运营成本较低的污水集中处理工艺; 另外, 根据研究区附近农田的灌溉需求, 可以将农村生活污水的资源化回用纳入污水治理规划中, 降低对处理工艺出水水质的要求。综上所述, 根据我国常用的生活污水处理技术特点, 巴公镇研究区的生活污水治理可以比选采用组合工艺: 生物接触氧化法+人工湿地/土壤渗滤系统、厌氧-好氧法+人工湿地/土壤渗滤系统、化粪池+生物滤池/稳定塘+农田回灌等。

4 结论

2021年10月—2023年3月, 本研究以北方地区黄河流域下的一个典型城郊型村镇——山西省晋城市巴公镇为研究区域, 探讨该城郊型村镇内以管道收集农村生活污水排入环境中时水温、水量和水质特点, 主要得出以下几项结论。

1) 巴公镇研究区排放的生活污水水温全年基本保持在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 且每年5月—10月期间, 污水水温升至 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保证了农村生活污水处理中微生物的活性以及冬季低温条件下的城郊型村镇生活污水处理工艺的除污效果; 研究区气温和污水水温呈显著正相关关系 ($R=0.955, P<0.01$), 水温的变化速率约为环境气温变化速率的0.4倍。

2) 巴公镇研究区内非雨季人均每日用水量和人均每日生活污水排放量分别为 $113\sim 170\text{ L}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $91\sim 136\text{ L}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$, 作为经济条件较好和居民生活水平较高的城郊型村镇, 人均每日用水量和污水排放量均较普通农村地区更高; 研究区污水总排放量变化范围为 $150\sim 600\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 主要受雨季降水、居民生活习惯、疫情管控、污水管道扩建和农户改厕的影响, 其中月均污水水量与月总降水量呈显著正相关关系 ($P<0.01$)。

3) 巴公镇研究区产生的污水中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD 4项污染物的平均浓度分别为 36.4 、 34.0 、 2.5 和 $131.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 整体较普通农村地区水平更低, 可生化性一般且波动范围较大; 研究期间, 人为的农户集中改厕工作是影响巴公镇研究区污水污染物浓度的主要因素; 污染物浓度受污水来源等因素的影响, TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP和COD 4项浓度之间具有较强的相关性, 变化趋势相近, 而水量与水质之间相关关系并不显著。

4) 巴公镇作为典型城郊型村镇, 根据其生活污水的排放特征, 分析该地区适用于单一生态或生物与生态相结合的处理技术, 需要选择对污水水量和水质波动的抗负荷能力较强、占地面积较小以及建设运营成本较低的污水集中处理工艺, 如生物接触氧化法+人工湿地/土壤渗滤系统、厌氧-好氧法+人工湿地/土壤渗滤系统、化粪池+生物滤池/稳定塘+农田回灌等。

参考文献

- [1] 侯京卫, 范彬, 曲波, 等. 农村生活污水排放特征研究述评[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2): 964-967.
- [2] USEPA. Onsite Wastewater Treatment Systems Manual[M]. USA: USEPA, 2002: 87-98.
- [3] 袁晓燕, 余志敏, 施卫明. 大河流域典型村镇生活污水排放规律和污染负荷研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1547-1557.
- [4] 程方奎, 汪晨晨, 温仓祥, 等. 太湖流域农村生活污水产污特征及治理模式分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 578-585.
- [5] 何源, 吕锡武, 郑向群, 等. 巢湖地区农村生活污水产污调研方法及实证[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 319-325.
- [6] 彭绪亚, 张鹏, 贾传兴, 等. 重庆三峡库区农村生活污水排放特征及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 758-763.
- [7] 陈旭斌. 城郊型村镇基础设施均等化配置效率评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [8] 杨坤, 宫阿都, 钟莉. 北京市城乡结合部污水处理设施运行管理对策研究[J]. 北京水务, 2011(5): 43-48.
- [9] 张广辉, 叶子祺. 乡村振兴视角下不同类型村庄发展困境与实现路径研究[J]. 农村经济, 2019(8): 17-25.
- [10] 陈润羊. 城郊区新农村建设中环境经济协同发展路径——以成都郊区为例[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(6): 736-739.
- [11] 陈茂霞, 王欢, 周后珍, 等. 成都市城乡结合部排污渠污水水质规律分析[J]. 四川环境, 2013, 32(3): 66-71.
- [12] 郑志龙. 论城镇化中的环境保护[J]. 经济师, 2007(7): 280.
- [13] 方小军, 周振, 王守中, 等. 城乡结合部污水处理技术优化及应用[J]. 水科学与工程学报, 2022(2): 10-12.
- [14] 中共泽州县委党史研究室. 泽州年鉴[M]. 太原: 山西出版传媒集团·三晋出版社, 2021.
- [15] MAKINIA J, WELLS S A. A general model of the activated sludge reactor with dispersive flow-I. model development and parameter estimation[J]. Water Research, 2000, 34(16): 3987-3996.
- [16] 张蓓. 农村(社区)污水集中收集厌氧强化预处理技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [17] 艾胜书, 田曦, 任之敏, 等. 低温对城市污水处理厂活性污泥特性影响的研究进展[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2013, 14(3): 41-43.
- [18] WANG Y, PENG Y, STEPHENSON T. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time(HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process[J]. Bioresource Technology, 2009, 99(14): 3506-3512.
- [19] 郝晓地, 孙思翠, 李季, 等. 污水处理过程水温变化模型构建与验证[J]. 环境科学学报, 2022, 42(12): 1-11.

- [20] 叶峰, 杨小丽, 王阿华, 等. 水温对太湖流域城镇污水厂除污效果影响的调研[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2): 28-30.
- [21] 张磊, 裴国霞, 张玉华, 等. 华北平原地区农村生活污水产污特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 410-415.
- [22] 廖日红, 顾华, 申颖洁, 等. 北京市农村生活污水排放现状调研与分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(2): 30-33.
- [23] 李厚禹, 蒯伟, 邵振鲁, 等. 新冠肺炎疫情对农村人居环境整治的影响[J]. 环境科学研究, 2020, 33(7): 1579-1588.
- [24] 刘智晓, 刘龙志, 王浩正, 等. 流域治理视角下合流制雨季超量混合污水治理策略[J]. 中国给水排水, 2020, 36(8): 20-29.
- [25] 黄素芬, 康潇, 薛晓光. 山西运城农村生活污水治理现状及对策[C]//中国环境科学学会. 2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷). 南京, 2020: 262-268.
- [26] 陈融旭, 张杨, 时芳欣, 等. 黄河流域农村生活污水特征及适宜处理技术分析[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2022 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(二). 南昌, 2022: 11-15.
- [27] 邢光熹, 施书莲, 杜丽娟, 等. 苏州地区水体氮污染状况[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 540-546.
- [28] BUTLER D, FRIEDLER E, GATT K. Characterising the quantity and quality of domestic wastewater inflows[J]. Water Science & Technology, 1995, 31(7): 13-24.
- [29] 杨希. 重庆市主城区居住小区生活污水排放特征及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [30] 陈雪峰, 李振军, 刘学军, 等. 成都平原农村生活污水中污染物特征研究[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2022 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(四). 南昌, 2022: 37-42.
- [31] 刘晓慧. 我国农村生活污水排放现状初析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(23): 234-235.
- [32] 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.
- [33] 聂莉娟. 关中农村生活污水处理工艺评价与选择[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [34] 徐佩林, 朱木兰, 张志谦. 农村生活污水的水质特征与治理策略探讨——以厦门农村为例[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 54-60.

(责任编辑: 曲娜)

Discharge characteristic of rural domestic sewage in typical northern suburban village

ZHANG Jingxing^{1,2}, HUANG Jinlou^{1,2,*}, JIANG Shan^{1,2}, LI Jing³

1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CAS-OASIS Ecological Engineering Technology Co. Ltd., Beijing 100096, China

*Corresponding author, E-mail: jlhuang@rcees.ac.cn

Abstract In recent years, with the rapid urbanization, suburban villages, as a kind of typical rural area, are facing increasingly serious environmental problems due to their faster economic development, more concentrated population and diversified industries than traditional rural regions. Suburban villages have gradually become the key points of rural sewage treatment. The research was carried out in a typical suburban village under the Yellow River Basin, and investigate the quality characteristics and the discharge dynamics of domestic sewage. Our study supplements the basic data of domestic sewage treatment in such typical rural areas, and helps to carry out sewage treatment in suburban villages more scientifically. The results show that the temperature of domestic sewage of study area is basically kept above 10 °C throughout the year; the daily discharge per capita is 91~136 L·cap⁻¹·d⁻¹ in non rainy season; the total sewage discharge varies from 150~600 m³·d⁻¹; the average levels of the TN, NH₄⁺-N, TP and COD are 36.4, 34.0, 2.5 and 131.0 mg·L⁻¹, respectively. In summary, the domestic sewage of suburban village has the characteristics of large sewage volume, low pollutant concentration and wide fluctuation range. So it is suitable for eco-treatment technology or the combination of biological and ecological domestic sewage treatment technology.

Keywords suburban villages; rural domestic sewage; discharge characteristic