

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.014

A²O 设施处理长三角平原地区农村生活污水的效果

陈江杰^{1,2}, 贺雷蕾², 刘锐², 赵远¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 浙江清华长三角研究院生态
环境研究所 浙江省水质科学与技术重点实验室, 浙江 嘉兴 314006)

摘要: 厌氧/缺氧/好氧(A²O)设施在长三角平原地区农村生活污水处理中应用广泛,此次调研了5个镇39个A²O设施对污染物的去除效果和进水量。结果表明,A²O设施进水COD、氨氮、TN、TP的浓度分别为(95±80)、(56.2±40.0)、(61.6±40.1)、(4.6±2.8) mg/L,部分设施进水浓度较低,说明污水收集有问题。由于进水量不稳定,A²O设施受降雨量影响很大,与设计规模有较大偏差。A²O设施对COD、氨氮、TN、TP的去除率分别为(46.9±30.5)%、(46.0±37.3)%、(19.7±18.7)%和(25.1±21.9)%,各设施之间对污染物的去除情况差别很大,出水COD达标率较高,但氨、磷达标率较低。进水COD浓度低引起的有机负荷与进水COD/TN值偏低、雨污分流不彻底引起的较大水力冲击负荷、进水水质水量波动大、设施运维工作不到位引起的生物脱氮除磷效果不佳,是A²O设施应用效果不理想的重要原因。

关键词: A²O; 农村生活污水; 脱氮除磷; 长三角平原地区

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0075-08

Performance of A²O Facilities for Rural Domestic Sewage Treatment in Yangtze River Delta Plain

CHEN Jiang-jie^{1,2}, HE Lei-lei², LIU Rui², ZHAO Yuan¹

(1. School of Environment & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment
in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University of Zhejiang, Jiaxing 314006, China)

Abstract: Anaerobic-anoxic-oxic (A²O) facilities are widely applied in rural domestic sewage treatment in the Yangtze River Delta plain. Pollutants removal performance and influent flow rate of 39 A²O facilities in five towns were investigated. The influent concentrations of COD, ammonia nitrogen (NH₃-N), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were (95±80) mg/L, (56.2±40.0) mg/L, (61.6±40.1) mg/L and (4.6±2.8) mg/L, respectively. The very low influent concentration in some facilities indicated that there was a problem in sewage collection. Due to the unstable influent flow rate, the A²O facilities were greatly affected by rainfall and deviated from the design capacity. The removal rates of COD, NH₃-N, TN and TP by the A²O facilities were (46.9±30.5)%, (46.0±37.3)%, (19.7±18.7)% and (25.1±21.9)%, respectively, and the removal performances varied greatly among facilities. The standard achieving rate of effluent COD was high, but those of effluent

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

通信作者: 刘锐 E-mail: liuruitsinghuazj@gmail.com; 赵远 E-mail: zhaoyuan12@tsinghua.org.cn

nitrogen and phosphorus were low. Important reasons for the poor performance of the facilities were as follows: the too low organic load and influent COD/TN ratio caused by the low concentration of influent COD, high shocking load caused by incomplete diversion of rain and sewage, dramatic fluctuation in quality and quantity of the influent, as well as poor biological removal of nitrogen and phosphorus caused by inadequate operation and maintenance of the facilities.

Key words: anaerobic – anoxic – oxic (A^2O); rural domestic sewage; nitrogen and phosphorus removal; Yangtze River Delta plain

近25年来,我国农村生活污水总排放量翻了一番,并且有大量未经处理的农村生活污水进入环境中,不仅引起水体富营养化和黑臭等问题^[1],还严重威胁饮用水水质安全。可见,大力推进农村生活污水治理已成为我国提升农村水环境质量的当务之急^[2]。

长三角地区人口密度高、经济发展活跃、环保压力大,对农村生活污水的治理需求迫切^[1]。为改善农村水环境,江浙沪在“十二五”期间建设了大量农村污水处理设施,其中厌氧/缺氧/好氧(A^2O)设施由于具有脱氮除磷功能被广泛应用。据统计,在浙江已建成的农村生活污水处理设施中, A^2O 设施占11.3%^[3],在上海此比例达到6.88%^[4],在江苏此比例也较高^[5]。然而在实际工程中发现, A^2O 工艺对农村生活污水中的氨氮、总氮、总磷的去除效果并不理想^[6]。

笔者调研了长三角平原地区5个镇共39个 A^2O 设施,研究了进水水质和水量的变化,调查了设施运维情况,分析了 A^2O 设施对COD、 NH_3-N 、TN和TP的去除效果,并从进水碳氮比、雨污混流和运维等角度探讨了 A^2O 设施在农村生活污水处理工程应用中的影响因素,旨在为提高我国农村生活污水处理设施的运行效果提供参考。

1 材料与方法

1.1 调研区域概况

以长三角平原地区的5个镇为研究区域,选取39个 A^2O 设施开展实际工程运行效果调查。上述研究区域水网密布,经济较为发达,村民的生活水平普遍较高,外出打工人员数量均较少;各镇普遍通过城乡一体化供应自来水,部分农户进行清洗等用水使用少量浅表井水,用水量普遍较节约,不存在浪费等问题。此外,由于当地严格禁止家庭畜禽养殖,所以农户生活污水的成分较纯粹,极少混入畜禽养殖废水。

1.2 水样采集与分析

于2018年1月、6月和10月采集设施的进水和出水水样。进水取自设施前的调节池,出水取自出水井,采样后在4℃下冷藏保存,3d内完成测试,按照《水和废水监测分析方法》(第4版)测定COD、TP、TN、 NH_3-N 等水质指标。另外,采样过程中,采用便携式溶氧仪测定各设施厌氧池、缺氧池和好氧池的溶解氧浓度。

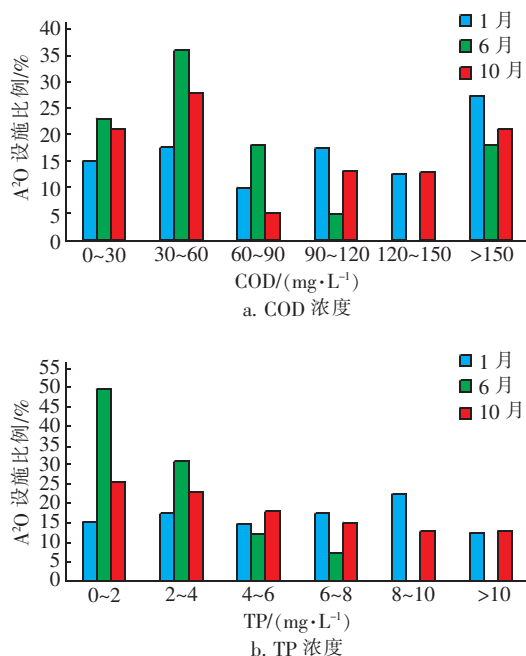
1.3 流量与降雨量数据的获取

39个设施中有17个在进水管安装了电磁流量计,可从当地的运维监管平台上连续读取。17个设施的设计规模分布如下:20 m³/d的设施5个,30 m³/d的设施3个,50 m³/d的设施4个,80 m³/d的设施5个。降雨量数据由当地气象局提供。

2 结果与分析

2.1 进水水质特征

39个设施进水COD、TP、 NH_3-N 、TN的浓度分布如图1所示。



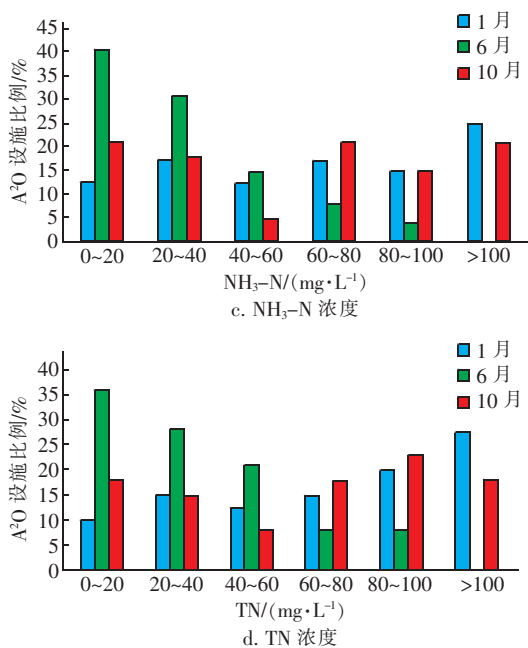


图 1 不同污染物进水浓度的设施比例
Fig. 1 Proportion of A²O facilities with different influent concentrations of COD, TP, NH₃ - N and TN

1 月份设施进水 COD 浓度为(119 ± 93) mg/L, 高于 60 mg/L 的设施占到 68%; 进水 TP 浓度为(6.0 ± 3.1) mg/L, 高于 2 mg/L 的设施占比为 85%; 进水 NH₃ - N 和 TN 的浓度分别为(74.6 ± 53.6)、(81.3 ± 51.7) mg/L, 高于 20 mg/L 的设施占比分别为 88% 和 90%。

与 1 月份相比,6 月份各设施的进水 COD 浓度普遍降低。进水 COD 浓度为(77 ± 80) mg/L, 高于 60 mg/L 的设施占到 43%; 进水 TP 浓度为(2.6 ± 1.8) mg/L, 高于 2 mg/L 的设施占比为 50%; 进水氨氮和 TN 的浓度分别为(27.7 ± 20.7)、(33.6 ± 23.7) mg/L, 高于 20 mg/L 的设施占比分别为 60% 和 65%。

与 6 月份相比,10 月份各设施的进水浓度普遍升高。进水 COD 浓度为(90 ± 67) mg/L, 高于 60 mg/L 的设施占到 53%; 进水 TP 浓度为(5.4 ± 3.5) mg/L, 高于 2 mg/L 的设施占比为 83%; 进水氨氮和 TN 的浓度分别为(66.2 ± 45.7)、(70.0 ± 44.9) mg/L, 高于 20 mg/L 的设施占比分别为 80% 和 83%。

综上所述,调研区域农村生活污水处理设施的进水污染物浓度为 1 月 > 10 月 > 6 月,在其他文献中也有类似报道^[7-8],这与用水习惯和生产活动的变化有关。6 月份平均气温较高,农民淋浴等用水量明显增加^[9],稀释了生活污水中的污染物浓度。

各设施进水中,NH₃ - N 在 TN 中的占比很高,1 月、6 月和 10 月分别达到了(95 ± 17)%、(79 ± 29)% 和(90 ± 23)%。把所有设施的进水 TN 与氨氮浓度进行线性关系拟合,结果发现 TN 与氨氮的线性相关性很好($y_{\text{氨氮}} = 0.96x_{\text{总氮}}, R^2 = 0.93$),各设施前端化粪池的消解效果均较好,经过化粪池内微生物的作用,有机氮的氨化反应完成度较高。

有 15% ~ 20% 的设施 3 个月的进水中各污染物浓度明显都很低(COD < 30 mg/L, TP < 2 mg/L, NH₃ - N 和 TN 均低于 20 mg/L),个别设施 NH₃ - N 和 TN 的浓度甚至低于 5 mg/L。分析原因:①污水收集不完全。农村早期建设的化粪池普遍采用砖砌或者混凝土结构,防渗性能较差,污染物渗漏进入地下而未进入污水处理设施。②地下水或农田水内渗。长三角平原河网地区地下水水位相对较高,地势低洼松软,当管道或检查井施工质量不过关时,存在地下水、河网地表水以及农田水内渗等情况,稀释了生活污水。

把本次调研的数据与全国其他地区进行比较,结果见表 1。

表 1 不同地区的农村生活污水水质特性

Tab. 1 Characteristics of rural domestic sewage in different regions

项 目	COD/(mg · L ⁻¹)	NH ₃ - N/(mg · L ⁻¹)	TN/(mg · L ⁻¹)	TP/(mg · L ⁻¹)	COD/TN 值	参考文献
调研区域	10 ~ 485	0.4 ~ 173.2	3.1 ~ 196.5	0.3 ~ 12.5	2.64 ± 2.25	本研究
北京农村	105 ~ 445	16.0 ~ 46.0	21.0 ~ 55.4	1.4 ~ 5.8	7	[10]
湖北农村	40 ~ 229	17.4 ~ 35.5	19.9 ~ 38.8	1.4 ~ 3.4	5	[11]
四川农村	468 ~ 1 001	1.6 ~ 7.9	19.5 ~ 24.9	2.2 ~ 5.0	33	[12]
浙江农村	135 ~ 639	25.6 ~ 54.7	36.5 ~ 76.2	2.1 ~ 9.1	7	[13]
江苏农村	62 ~ 235	14.1 ~ 52.6	19.5 ~ 61.5	2.0 ~ 4.8	4	[14]
上海郊区	16 ~ 1 400	0.1 ~ 277.0	—	0.1 ~ 37.0	—	[15]

由表 1 可知,不同地区农村生活污水水质差异较大。本研究中,TP 的平均浓度为 4.6 mg/L,略高

于湖北地区,与其他地区相近;TN 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的平均浓度分别为 61.6 和 56.2 mg/L,皆高于除上海外其他地区的平均值,且研究区域有机氮氨化程度高,这与污水在化粪池内停留时间长有关。本研究,农村生活污水 COD 的浓度为 10 ~ 485 mg/L,平均浓度为 95 mg/L,与湖北、江苏两地的文献报道结果接近,但远低于北京、上海、四川等地区,其原因还需要进一步探究,可能与饮食结构和生活习惯有关,另外也可能受污水处理设施前端化粪池与输送管网内生物作用的影响。王玉华等^[16]指出,良好运行的三格化粪池对 COD 有 50% 左右的去除效果。金鹏康等^[17]的研究表明,管道的沉积作用和管内微生物会去除生活污水中一部分有机物,所以 COD 在流入进水井前已被去除了一部分,导致 COD 浓度较低。进水 COD 浓度低,导致进水 COD/TN 值也很低,只有 2.64 ± 2.25 ,接近湖北和江苏的相关数值,但远小于全国其他地区。

研究区域实际水质与设计水质差异较大。根据承建和运维管理单位提供的设施简介资料,调研区域 A^2O 设施的设计进水 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 浓度分别为 200 ~ 400、30 ~ 60、2.5 ~ 5 mg/L,而实际进水 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 浓度分别为 (95 ± 80) 、 (56.2 ± 40.0) 、 (4.6 ± 2.8) mg/L。虽然 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TP 的平均浓度处于设计范围内,但实际进水 COD 浓度远低于设计值。低 COD 浓度导致聚磷菌和反硝化菌等异养微生物长期得不到充足的碳源作为能量,只能依靠内源代谢^[18],这导致活性污泥浓度普遍不高, A^2O 设施的脱氮除磷作用得不到充分发挥,出水氮磷浓度容易超标。

调研区域大部分 A^2O 设施的进水 COD/TN 值较低,不利于脱氮除磷。研究表明,当进水 COD/TN 值 < 4 时, A^2O 工艺的脱氮除磷效果将会恶化^[19]。邱兆富等人^[20]进行了规模为 100 m^3/d 的 A^2O 中试,发现当进水 COD/TN 值为 3.4 时,TN 和 TP 的去除率分别为 40.7% 和 8.8%。而正常运行的城市污水处理厂(进水 C/N 值为 8 ~ 10),TN 与 TP 的去除率均能达到 60% 以上。

2.2 进水量特征

2018 年 6 月—11 月,17 个 A^2O 设施的当月日均进水量与日均降雨量的变化如图 2 所示。可以看出,6 月—8 月,调研区域 A^2O 设施的当月日均进水量逐月上升,8 月达到最大,且 8 月的日均降雨量也

显著高于 6 月和 7 月;9 月—11 月的当月日均进水量低于 7 月和 8 月,当月日均降雨量较 8 月也有所降低;10 月的日均进水量和降雨量均最低。6 月—9 月, A^2O 设施的当月日均进水量均不同程度地高于平均设计规模,而 10 月和 11 月的当月日均进水量低于设计规模。

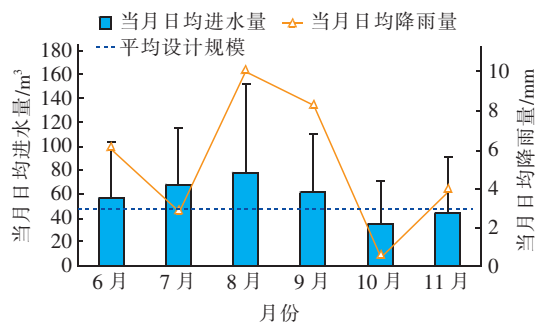


图2 A^2O 设施当月日均进水量与降雨量的变化

Fig.2 Variation of average daily influent quantity and rainfall of A^2O facilities

日均进水量与降雨量随月份的变化规律相似,说明 A^2O 设施中可能有雨水混入。目前,农房排水管道普遍安装不够规范,雨污不分流或分流不彻底,下雨时雨水直接被排入污水设施;对室外洗衣池的地排口周围缺少有效保护,导致下雨时地排口成为农村街道的排雨口。此外,管网质量不佳也可能造成雨水进入。6 月—9 月进水量较大,一方面是该阶段恰好是雨季,存在雨水混入等现象;另一方面,气温升高、农户洗澡等用水量增大也是重要原因。进水量超出设计规模较多时,会减小 A^2O 设施各段的水力停留时间,影响污染物的去除效果和设施的稳定性。当瞬时进水量过大时,还会引起生化池填料上的生物膜脱落,致使微生物流失。为保障设施长久稳定运行,需要加强农房雨污分流建设,对破损管网进行修补,减少外来水的混入。其次,通过增大调节池容积、均匀进水量等方式,减少进水量的波动。

2.3 A^2O 设施的运维状况

A^2O 设施的运维状况调研主要包括设施前端收集系统及处理终端。收集系统包括接户设施(隔油池、化粪池、出户管)及管网系统(检查井和管道)。调研发现,研究区域农村生活污水收集系统在设计、建设和运维中存在的问题较多,影响处理终端的效果稳定与作用发挥。其主要问题体现在:①接户设施,部分区域化粪池以改造为主,但由于未做好化粪池的改造防渗,存在污水渗漏问题。少数化粪池、隔

油池堵塞较为严重,影响污水收集。部分地区将灰水接入化粪池的第一格中,导致化粪池进水量过大,沉淀不完全,部分污物进入管网中。②三水接入,三水接入情况基本较好,但也存在部分露天洗涤废水未收集及雨水接入的情况,雨污合流情况较为普遍。③管网系统,管网质量存在问题,如管网埋深不足及未按要求施工导致受压后漏损、砖砌检查井并未完全防渗、塑料井连接扣漏水等。另外,部分地区管网标高存在问题,导致污水倒灌或部分检查井满溢。

运维人员尚未能对 A²O 设施进行准确控制。设施前端调节池主要存在的问题是泵提升不及时导致液位过高、格栅堵塞,这与提升泵流量过大、液位控制的准确性、格栅清渣频次均有关系。A²O 设施运维时常存在瞬时进水量和曝气量过大、回流不准等问题。瞬时进水量过大将导致池体内微生物流失并使处理时间减短,降低污染物的去除效果。曝气量与回流不准将无法保证各生化池中溶解氧浓度,最终导致脱氮除磷效果不佳。为保证 A²O 的脱氮除磷效果,厌氧段、缺氧段和好氧段的 DO 应分别控制在 0.2 mg/L 以下、0.2 ~ 0.5 mg/L 和 2 mg/L 左右^[21]。但根据本研究对 39 个 A²O 设施生化池溶解氧浓度的现场实测结果,厌氧段、缺氧段和好氧段溶解氧浓度设置普遍不正确,其浓度分别为 (0.4 ± 0.2) 、 (4.1 ± 2.3) 、 (5.5 ± 3.7) mg/L。好氧池内溶解氧浓度远高于正常值,容易导致污泥老化,影响脱氮效率。缺氧池与厌氧池内溶解氧浓度相对较高,会消耗碳源,抑制缺氧池内硝态氮的还原反应,降低厌氧池内聚磷菌的释磷量,最终导致 TN 与 TP 去除率降低。此外,各设施长期不排泥(甚至半年或 1 年排 1 次)也影响到对 TP 的去除。

2.4 A²O 设施对污染物的去除效果

不同污染物去除率的设施比例见图 4。可以看出,A²O 设施对 COD 和 NH₃-N 的去除率相对较高,对 TN 和 TP 的去除率明显偏低。对 COD 的去除率为 $(46.9 \pm 30.5)\%$,其中去除率低于 20% 的设施占 17.5% ~ 35.9%;对 NH₃-N 的去除率为 $(46.0 \pm 37.3)\%$,其中去除率低于 20% 的设施占 17.5% ~ 35.9%;对 TN 的去除率为 $(19.7 \pm 18.7)\%$,其中去除率低于 20% 的设施占 46.2% ~ 56.0%;对 TP 的去除率为 $(25.1 \pm 21.9)\%$,其中去除率低于 20% 的设施占 45.0% ~ 56.4%,低于 10% 左右的设施对 TP 的去除率达到 60% 以上。

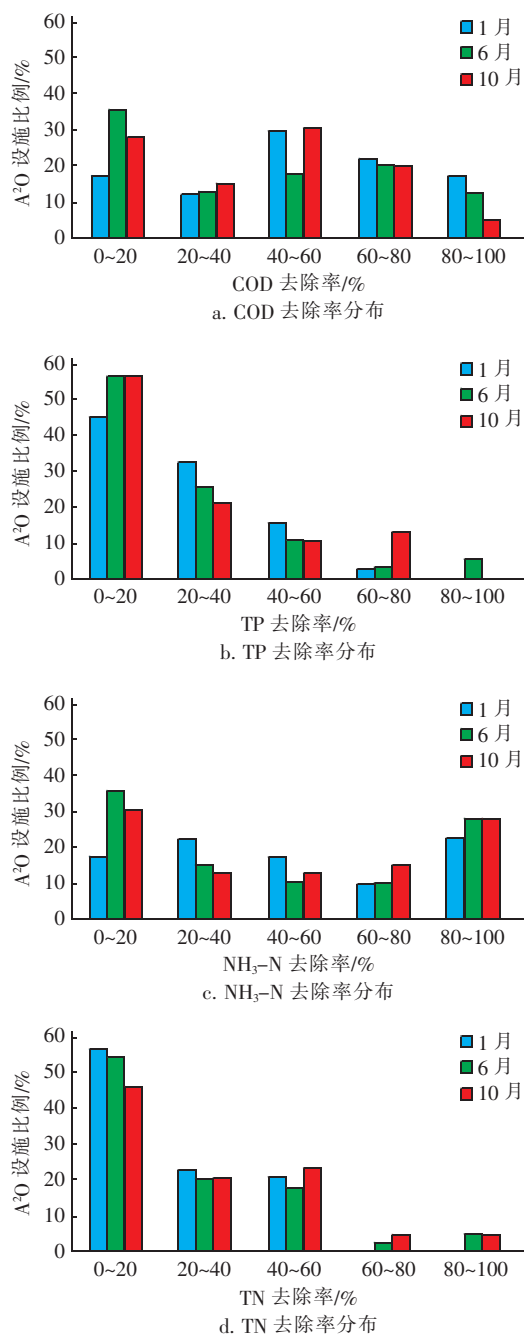


图3 不同污染物去除率的设施比例

Fig. 3 Proportion of A²O facilities with different pollutant removal rates

1月、6月和10月 A²O 设施对 COD 的去除率分别为 $(49.0 \pm 36.6)\%$ 、 $(43.0 \pm 30.5)\%$ 、 $(46.3 \pm 23.8)\%$,由于温度对厌氧段反应无明显影响,且 1 月农民用水量少、水力停留时间长,导致 1 月的去除率略大于其他两个月份。低温会降低缺氧池反硝化速率及好氧段硝化速率,反硝化的最佳温度为 15 ~ 25 °C^[22]。因此,1 月份 NH₃-N 及 TN 去除率[分别

为 $(42.5 \pm 39.7)\%$ 、 $(12.8 \pm 11.5)\%$]明显低于6月份 $[(47.4 \pm 35.5)\%$ 、 $(25.6 \pm 21.3)\%$]和10月份 $[(51.3 \pm 34.2)\%$ 、 $(29.8 \pm 25.7)\%$]。1月、6月、10月的TP去除率分别为 $(24.9 \pm 18.8)\%$ 、 $(22.0 \pm 25.6)\%$ 、 $(25.7 \pm 24.2)\%$,各月之间无明显差异。

表2为A²O设施出水对应不同标准的达标率。其中,浙江省采用浙江地方标准(简称浙江地标)《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB

33/973—2015),而江苏、上海、安徽目前仍然采用《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准(简称城镇一级B)。结果表明,A²O设施的COD达标率均在83%以上;NH₃-N达标率不佳,大多在31%~44%之间;6月TN达标率为51%,10月为28%,而1月仅为15%;TP达标率大部分在13%~33%之间,1月达标率仅为3%~29%,比6月和10月的低。从达标率的情况来看,A²O设施的脱氮除磷效果并不理想,特别是在冬季。

表2 A²O设施出水对应不同标准的达标率

Tab. 2 Standard achieving rate of effluent quality

项 目		COD		NH ₃ -N		TN		TP	
		限值/ (mg·L ⁻¹)	达标 率/%	限值/ (mg·L ⁻¹)	达标 率/%	限值/ (mg·L ⁻¹)	达标 率/%	限值/ (mg·L ⁻¹)	达标 率/%
1月	浙江地标一级	60	83	15	53	—	—	2	29
	城镇一级B	60	83	8	38	20	15	1	3
6月	浙江地标一级	60	95	15	62	—	—	2	56
	城镇一级B	60	95	8	41	20	51	1	23
10月	浙江地标一级	60	87	15	44	—	—	2	33
	城镇一级B	60	87	8	31	20	28	1	13

A²O工艺应用于城市污水厂脱氮除磷的效果普遍较好^[23],但用在农村生活污水处理时脱氮除磷效果不佳,考虑有以下几点原因:①进水水质与设计水质差异较大,COD浓度与COD/TN值过低。②雨水混入造成进水量冲击较大,影响设施的生化效果与稳定运行。③进水水质和水量波动较大,影响设施的稳定运行。对于设计规模小的设施,目前缺少小流量、抗污堵的潜污泵,所以很多设施使用较大进水泵,采用间歇进水的方式。由于农村生活污水进水量和水质具有时间上非均匀性的特点^[24],所以容易导致水力停留时间不足或污染负荷过高等问题,出水中个别水质指标容易超标。④运维工作不到位,影响设施的正常、稳定运行。

综上所述,虽然在实验室条件下采用A²O设施处理农村生活污水取得了很好的效果,但是在实际工程应用中还存在诸多问题,污染物去除效果普遍不理想。为提高农村A²O设施的运行效果,有必要对当地污水的水质、水量变化规律进行更详细的调研。为保证A²O设施的稳定运行,需要采用严格的雨污分流措施并提升管网质量,此外还需要对A²O设施的曝气方式等运行条件进行更精细化的设置。同时,也需要对设施运维人员进行全面、专业的培训,完善运维与监管制度,使得A²O设施的运维工

作能够及时、科学、有效地开展。对于碳源低、总氮和总磷难满足A²O设施要求的进水,可后置人工湿地等生态工艺进行强化,依靠生态单元内植物和微生物的作用,进一步去除污水中的氮、磷,保证出水水质达标。另外,还可以采用多点进水的方式,提高碳源利用率。

3 结论

① 调研区域中A²O农村生活污水处理设施的进水水质随月份、地区的变化差异较大。进水COD、NH₃-N、TN、TP的浓度分别为 (95 ± 80) 、 (56.2 ± 40.0) 、 (61.6 ± 40.1) 、 (4.6 ± 2.8) mg/L,与设计进水水质差异较大,进水COD浓度与COD/TN值较低,不利于脱氮除磷。A²O设施的进水量不稳定,受降雨量影响较大。

② A²O设施对COD、氨氮、TN、TP的去除率分别为 $(46.9 \pm 30.5)\%$ 、 $(46.0 \pm 37.3)\%$ 、 $(19.7 \pm 18.7)\%$ 和 $(25.1 \pm 21.9)\%$,出水COD达标率高(83%以上),但氮、磷达标率低。

③ 为提高农村A²O设施的运行效果,有必要对当地生活污水的水质、水量进行详细调研,改进工艺,加强雨污分流及管网质量,研究进水与曝气方式的优化方法,分析冬季设施运行对策,同时也要对设施运维人员进行专业培训,完善运维与监管制度。

参考文献:

- [1] 张亚平,王海芹,印杰,等.太湖流域农村生活污水处理技术模式调查和分析——以江苏省为例[J]. 农业资源与环境学报,2017,34(5):483-491.
Zhang Yaping, Wang Haiqin, Yin Jie, *et al.* Investigation and analysis on technical modes of rural domestic sewage treatment in Taihu Lake basin; Taking Jiangsu Province as an example [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(5): 483-491 (in Chinese).
- [2] 鞠昌华,张卫东,朱琳,等.我国农村生活污水治理问题及对策研究[J]. 环境保护,2016,44(6):49-52.
Ju Changhua, Zhang Weidong, Zhu Lin, *et al.* China's rural sewage treatment problems and countermeasures [J]. Environmental Protection, 2016, 44(6): 49-52 (in Chinese).
- [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,2015,31(4):473-477.
Xu Zhirong, Ye Hongyu, Zhuo Ming, *et al.* Status quo and strategies of rural sewage treatment in Zhejiang Province [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 473-477 (in Chinese).
- [4] 谢胜.上海市农村生活污水处理工艺适用性评估与分类体系研究[D]. 上海:华东师范大学,2013.
Xie Sheng. Study on Applicability Assessment and Classification System of Rural Sewage Treatment Technology [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013 (in Chinese).
- [5] 龙珍,韦斯,张亚平,等.江苏省太湖流域农村生活污水处理现状及对策研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(10):17-20,82.
Long Zhen, Wei Si, Zhang Yaping, *et al.* Status quo and strategies of rural sewage treatment in Taihu River basin of Jiangsu Province [J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(10): 17-20, 82 (in Chinese).
- [6] 汤博,许明珠,徐志荣,等.浙江省农村生活污水处理工艺对比分析及适用性研究[J]. 湖北农业科学,2016,55(14):3597-3600.
Tang Bo, Xu Mingzhu, Xu Zhirong, *et al.* Study of comparative analysis and applicability on treatment process of rural domestic sewage in Zhejiang Province [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(14): 3597-3600 (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] 王丽丽,李艳菊,袁聪颖,等.巢湖流域典型村庄生活污水水质年变化特征[J]. 环境化学,2012,31(7):998-1002.
Wang Lili, Li Yanju, Yuan Congying, *et al.* Temporal change of water quality of the typical rural domestic sewage in Chaohu Lake basin [J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(7): 998-1002 (in Chinese).
- [9] 尹微琴,王小治,王爱礼,等.太湖流域农村生活污水污染物排放系数研究——以昆山为例[J]. 农业环境科学学报,2010,29(7):1369-1373.
Yin Weiqin, Wang Xiaozhi, Wang Aili, *et al.* Discharge index of pollutants from village sewage in Taihu region—A case study in Kunshan [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(7): 1369-1373 (in Chinese).
- [10] 邱彦昭.北京市农村污水处理设施现状调研及运营管理措施研究[D]. 北京:北京化工大学,2016.
Qiu Yanzhao. Investigation of Status of Beijing Rural Sewage Treatment Facilities & Research on Operation Management Measures [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016 (in Chinese).
- [11] 孙瑞敏.湖北省农村生活污水水量水质调查与分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
Sun Ruimin. Investigation and Analysis of Rural Wastewater Quantity and Quality in Hubei Province [D]. Wuhan: Wuhan University and Technology, 2010 (in Chinese).
- [12] 谢燕华,刘壮,勾曦,等.西南地区农村生活污水水质分析及村民意愿调查[J]. 环境工程,2018,36(8):165-169,188.
Xie Yanhua, Liu Zhuang, Gou Xi, *et al.* Analysis on quality of domestic sewage and investigation of villagers' willingness from the rural areas of southwest China [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 165-169, 188 (in Chinese).
- [13] 冯华军,冯小晏,薛飞,等.浙江省典型地区生活污水水质调查研究[J]. 科技通报,2011,27(3):436-440.
Feng Huajun, Feng Xiaoyan, Xue Fei, *et al.* Sewage quality investigation research in typical region of Zhejiang Province [J]. Bulletin of Science and Technology, 2011, 27(3): 436-440 (in Chinese).

- [14] 周晓莉, 俞锋, 朱光灿, 等. 江苏农村生活污水处理设施进水水质调查分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1445 - 1449.
Zhou Xiaoli, Yu Feng, Zhu Guangcan, *et al.* Investigation and analysis of influent quality of wastewater treatment facilities in rural areas of Jiangsu Province, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(3): 1445 - 1449 (in Chinese).
- [15] 钟春节. 上海郊区农村生活污水处理系统的成效评估及适应性管理研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
Zhong Chunjie. Study on the Effectiveness Evaluation of Rural Sewage Treatment Systems and Its Adaptive Management in the Suburbs of Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011 (in Chinese).
- [16] 王玉华, 方颖, 焦隽. 江苏农村“三格式”化粪池污水处理效果评价[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 80 - 83.
Wang Yuhua, Fang Ying, Jiao Jun. Evaluation of night soil treatment efficiency of “Three-Grille-Mode” septic tanks in the rural area of Jiangsu [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(2): 80 - 83 (in Chinese).
- [17] 金鹏康, 郝晓宇, 王宝宝, 等. 城市污水管网中水质变化特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 1009 - 1014.
Jin Pengkang, Hao Xiaoyu, Wang Baobao, *et al.* Characteristics of water quality variation in sewer networks [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 1009 - 1014 (in Chinese).
- [18] Ge S J, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Enhanced nutrient removal in a modified step feed process treating municipal wastewater with different inflow distribution ratios and nutrient ratios [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(23): 9012 - 9019.
- [19] Zhao W H, Huang Y, Wang M X, *et al.* Post-endogenous denitrification and phosphorus removal in an alternating anaerobic/oxic/anoxic (AOA) system treating low carbon/nitrogen (C/N) domestic wastewater [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 339: 450 - 458.
- [20] 邱兆富, 王晓霞, 吕树光, 等. A^2O 与 ALO 工艺处理低 C/N 值城市污水的对比[J]. 中国给水排水, 2012, 28(15): 12 - 15, 20.
Qiu Zhaofu, Wang Xiaoxia, Lü Shuguang, *et al.* Comparison between A^2O and ALO processes for treatment of municipal wastewater with low C/N ratio [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(15): 12 - 15, 20 (in Chinese).
- [21] 马宁, 汪浩, 刘操, 等. 污水厂提标改造中 A^2O 工艺研究与应用趋势[J]. 中国给水排水, 2016, 32(20): 29 - 33.
Ma Ning, Wang Hao, Liu Cao, *et al.* Research and application of A^2O process for upgrading and reconstruction of WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(20): 29 - 33 (in Chinese).
- [22] 李帅, 李新峰. A/A/O 工艺在全地埋式城市污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(4): 62 - 64.
Li Shuai, Li Xinfeng. Application of A/A/O process in underground municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(4): 62 - 64 (in Chinese).
- [23] 李昌湖, 范举红, 徐子松, 等. 桐乡市城市污水处理厂 A^2O 工艺净化水质效果及影响因素研究[J]. 环境工程, 2012, 30(S2): 130 - 134.
Li Changhu, Fan Juhong, Xu Zisong, *et al.* Study on water purifying effect and affecting factors of A^2O process in Tongxiang WWTP [J]. Environmental Engineering, 2012, 30(S2): 130 - 134 (in Chinese).
- [24] 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.
Hou Jingwei, Fan Bin, Qu Bo, *et al.* Review about characteristics of rural domestic wastewater discharge [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(2): 964 - 967 (in Chinese).



作者简介: 陈江杰 (1994 -), 男, 江苏无锡人, 硕士, 主要研究方向为水污染防治技术。

E-mail: 13951573122@163.com

收稿日期: 2019 - 11 - 14