

A²/O 工艺脱氮除磷运行效果分析

肖飞¹, 康增彦², 王维红¹

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 中建三局安装工程有限公司, 湖北 武汉 430079)

摘要:采用统计学方法对新疆某污水处理厂 A²/O 工艺进行进水水质数据分析,发现数据存在严重自相关现象,运用主成分消除法和岭回归消除法以消除自相关性。结果表明:TN 和 TP 是污水厂提标改造的关键;碳源匮乏和缺氧区存在溶解氧(DO)是 TN 去除不佳的主要原因;适当提高污泥浓度(MLSS)和水力停留时间(HRT)是强化 TP 去除的措施;温度是影响脱氮除磷的主要因素。将温度模型与自相关磷模型相结合,可提高磷模型精度,有利于出水 TP 的预测。降低 DO、增加外碳源,控制 MLSS 为 3 500 mg/L~4 500 mg/L、HRT 为 5.4 h~8.0 h、厌氧区和好氧区 DO 为 0.3 mg/L 和 2 mg/L、污泥龄(SRT)为 11 d~12 d,可提升工艺脱氮除磷效果。

关键词: 脱氮除磷;A²/O 工艺;统计学方法;磷模型;提标潜力;自相关性

中图分类号:X703

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2022)03-0067-05

Operation Effect Analysis of Nitrogen and Phosphorus Removal in A²/O Process

XIAO Fei¹, KANG Zeng-yan², WANG Wei-hong¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumchi,

Xinjiang 830052, China; 2. China Construction Third Bureau Installation Engineering Co., Ltd.,

Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: Statistical method was used to analyze the inlet water quality data of A²/O process of a sewage treatment plant in Xinjiang, and it was found that there was a serious autocorrelation phenomenon in the data. Principal component elimination method and ridge regression elimination method were used to eliminate the autocorrelation. The results showed that TN and TP were the key to the upgrading and reconstruction of sewage plant. The lack of carbon source and the existence of dissolved oxygen (DO) in anoxic zone were the main reasons for poor TN removal. Properly increasing sludge concentration (MLSS) and hydraulic retention time (HRT) were the measures to strengthen TP removal. Temperature was the main factor affecting nitrogen and phosphorus removal. Combining temperature model with autocorrelation phosphorus model could improve the accuracy of phosphorus model, and was beneficial to the prediction of TP in effluent water. Reducing DO, increasing external carbon sources, controlling MLSS to 3 500 mg/L~4 500 mg/L, HRT to 5.4 h~8.0 h, DO to 0.3 mg/L in anaerobic zone and 2 mg/L in aerobic zone, SRT to 11 d~12 d, could improve the effect of nitrogen and phosphorus removal.

Key words: Nitrogen and phosphorus removal; A²/O process; Statistical method; Phosphorus model; Upgrading potential; Autocorrelation

随着新疆工业生产的飞速发展,其污水处理厂接纳水体类型变得越来越复杂,存在进水量不稳定、进水水质波动大、含有多种含氮污染物等问

收稿日期:2021-02-19;修订日期:2022-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51968071)

作者简介:肖飞(1993—),男,四川绵阳人,在读研究生,研究方向为污水处理。

题^[1-2]。为达到国家《水污染防治行动计划》的要求,有必要对排水水质超标的污水厂进行提标改造,使之达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。实施污水厂升级改造带来的投资成本会提高污水厂自身的承受能力,故探索其除污过程最佳工艺参数具有一定意义。虽然统计学方法在优化污水厂的设计、评价运行等方面发挥着重要的参考价值,但其对污水厂的评价运行仍存在局限^[3-5]。低温季节,污水厂会受到温度的影响,优化效果并不显著。

今以新疆某污水厂为研究对象,提出一种基于统计学的温度模型。运用该模型对污染源和水质间的相关性进行研究,从而找出需要重点关注的因子,并采取可行的多目标诊断优化措施,以期确保污水厂水质达标排放。

1 污水处理厂概况与研究方法

1.1 污水厂概况

新疆某污水厂采用水解酸化+同步脱氮除磷工艺(A²/O)。工艺中厌氧区、缺氧区和好氧区的水力停留时间(HRT)分别为2.8 h、3.6 h和5.4 h,好氧池的溶解氧(DO)控制在0.9 mg/L~4 mg/L, MLSS为3 500 mg/L~5 500 mg/L,水温为10℃~30℃。进水水质涉及化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、生化需氧量(BOD)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)和总磷(TP),实际进水指标差值分别为210 mg/L、120 mg/L、200 mg/L、84 mg/L、23.05 mg/L和55 mg/L,进水指标波动较大,出水不满足一级 A 标准。

1.2 分析方法

采用统计学 SPSS 25.0 软件和 Matlab 工具箱进行数据分析,利用 Spearman 系数进行水质指标的相关性分析,用主成分分析法确定运行效果等指标。

2 结果与讨论

2.1 可靠性系数模型

采用可靠性系数法分析可知,COD、SS 和 BOD 的出水值能保证 95% 达标率,满足一级 A 标准,偶有出水 NH₃-N 超标,可通过调控污水厂相关性能达到一级 A 标准。然而,出水 TN、TP 瞬时差较大,均需要分别控制在 14.62 mg/L、0.48 mg/L 才能保证稳定达到一级 A 标准,即污水厂提标改造的重点为 TN 和 TP。

2.2 主要影响因素的数据自相关

先考虑 6 个影响氮、磷超标的主要因素: X₁、X₂、X₃、X₄ 分别为 COD、SS、BOD、NH₃-N 的质量浓度, X₅ 为温度(T), X₆ 为污泥回流比(R)。设 Y₁、Y₂ 分别为 TN、TP 的质量浓度。根据变量之间的相关性,建立相关系数矩阵。结果表明, Y₁、Y₂ 与 X₃ 之间的相关系数均超过 0.7, 存在较强的自相关现象; Y₁ 与 X₅、Y₁ 与 X₆、Y₂ 与 X₅ 之间存在中等相关性; X₁ 与 X₃、X₂ 与 X₅ 之间也存在相关性,有利于相关性特征分析。

2.3 TP、TN 与相关性特征的模型建立

2.3.1 磷模型建立

根据污水处理厂运行过程的实测数据,生物脱氮时 C/N 为 6.25,生物除磷时 C/P 为 99.5,其物料守恒方程为^[6]:

$$S_i = \frac{S_{\text{BOD}}}{C/P} \quad (1)$$

$$v \frac{ds}{dt} = E_i \times S_i - E_e \times S_e - p' - p'' \quad (2)$$

$$p' = E_i \times \left[\frac{S_{\text{BOD}}}{C/P} - \left(S_{\text{BOD}} - \frac{S_{\text{BOD}}}{C/N} \times 6.25 \right) \times 1.01\% \right] \quad (3)$$

$$p'' = \frac{10^{-4} \times E_i \times m - (E_i \times K + p')}{S} \times \frac{1+R}{R} \times \frac{E_i \times (S_{\text{BOD}} - S'_{\text{BOD}})}{V \times F/M} \times N \times 1.01\% \quad (4)$$

$$\text{令: } J = \left(S_{\text{BOD}} - \frac{S_{\text{BOD}}}{C/N} \times 6.25 \right) \times 1.01\%,$$

$$X = \frac{1+R}{R} \times \frac{E_i \times (S_{\text{BOD}} - S'_{\text{BOD}})}{V \times F/M}$$

式中: E_i 为进水流量, m³/d; E_e 为出水流量, m³/d; S_i 为进水 TP 质量浓度, mg/L; S_e 为出水 TP 质量浓度, mg/L; p' 为每天化学除磷的质量, g/d; p'' 为每天生物除磷的质量, g/d; S_{BOD} 为进水 BOD 质量浓度, mg/L; S'_{BOD} 为出水 BOD 质量浓度, mg/L; m 为污泥排放量, kg/m³; K 为药剂投放量, mg/L; S 为污泥密度, mg/L; F/M 为有机负荷, d⁻¹; N 为污泥含率, %; V 为反应池体积, m³。

当系统处于稳定状态时(即 $v \frac{ds}{dt} = 0$), 得到公式(5)。

$$S_e = \frac{E_i}{E_e} \times \left[\frac{K - \frac{S_{\text{BOD}}}{C/P} - 100 \times m}{S \times 10^6} \times N \times X \times \right]$$

$$1.01\% + J \times \left(1 + \frac{N \times X \times 1.01\%}{S \times 10^6} \right) \quad (5)$$

由此可知,影响磷模型的主要自相关因素是 BOD、COD、TN、MLSS 与 R 。

2.3.2 磷模型可靠度验证

取污水厂5月份实际进水指标作为研究数据,带入自相关磷模型进行出水 TP 预测。其余数据指标以进水设计的平均值为例, E_i 为 1 250.00 m³/h, S_{COD} 为 603.60 mg/L, S'_{COD} 为 42.89 mg/L, S_i 为 71.91 mg/L, MLSS 为 4 325.00 mg/L。排泥量、药剂添加量和 R 分别取 0.20 kg/m³、18.00 mg/L 和 60.00%。由计算可知,实际值和模拟值的数据点索引分别有五六个指标不符合一级 A 标准。同时,发现部分符合一级 A 标准的原始数据经模拟后高于排放限值 0.5,表明模拟结果存在较大误差。数据之间存在自相关性会引起数学模型的精度和可靠性失真^[7],须消除磷模型自相关现象。

2.4 消除因素自相关性

主成分分析法消除:应用 Matlab 工具箱 statistics-2D 命令构造 Y_2 与 $X_1 \sim X_6$ 等 6 个相互正交的主成分变差累计解释表可知,有 95.50% 的变差可以用 X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_6 来解释,而 X_1 和 X_4 在累计变差解释中占比极小,表明这 2 个正交主成分不是影响出水 TP 的关键因素。在保证除磷效率的泥龄下,提

$$S_e = \frac{E_i}{E_e} \times \left[\frac{K - \frac{S_{\text{BOD}}}{\text{C/P}} - 100 \times m}{S \times 10^6} \times \frac{E_i \times S_{\text{BOD}} \times N \times (Z - 1) \times (1 + R)}{R \times V \times F/M \times Z} \times 1.01\% + J + \frac{J}{S \times 10^6} \times \frac{E_i \times S_{\text{BOD}} \times N \times (Z - 1) \times (1 + R)}{Z \times R \times V \times F/M} \times 1.01\% \right] \quad (9)$$

式中: θ_i 为温度系数,夏季取值 1.03,冬季取值 1.05; t_h (HRT_h) 为水力停留时间, h。

2.6 模型精度的验证

在相邻时间段内,选取相同月份的数据以验证改进磷模型的预测精度。引进温度和 HRT 后,与自相关磷模型的敏感性相比,误差区间为 0.04 ~ 1.29,平均误差为 0.276,平均百分比误差降低 19.44%,出水 TP 满足一级 A 标准,去除率提升 10%,表明模型精度进一步改善。确定影响 TP 出水异常的因素有 C/N、C/P、TN/TP、 T 、 R 和 HRT。

2.7 各因素对 TP 去除率的影响

进水中 BOD/TP > 20 的累计概率为 96.67%,平均值为 33.72,进水基质能满足生物除磷的需要。初期阶段,进水底物比值较低,碳源丰富。

高 MLSS 会降低 SS,降低的 SS 对除磷影响不大^[8]。因此, X_1 、 X_2 、 X_4 这 3 个主成分可剔除。

岭回归法消除:以出水 TP 质量浓度作为主偏差因子,经岭回归试算,发现各因素从上至下依次为 X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_4 、 X_1 、 X_6 。可见,除 NH₃-N 外,其他主成分的相关系数随 TP 出水质量浓度值变化极小,这与主成分消除法的部分结果一致。从岭回归结果来看,岭系数 $k > 0.5$ 时,岭迹曲线趋于稳定。除 NH₃-N 外,其他相关因素均不可剔除,而 X_1 、 X_2 对磷模型精度影响较小,可剔除,仅用 X_3 、 X_5 、 X_6 这 3 个主成分因素可消除自相关性。此外, T 在磷模型的建立中起决定性作用。

2.5 磷模型的敏感性改进

当水温为 15 °C ~ 25 °C 时,微生物的衰减常数 K_d 随着阿累尼乌斯方程变化,若在 32 °C 时则有明显偏差^[9]。结合污水厂 4—5 月份的温度数据显示,温度方程满足要求,可引入磷模型:

$$K_d(T) = K_{d(25)} \times \theta_i^{(T-20)} \quad (6)$$

$$S'_{\text{BOD}} = \frac{S_{\text{BOD}}}{1 + 0.8K_{d(T)} \times C_{\text{MLSS}} \times \text{HRT}_h} \quad (7)$$

$$\text{令: } Z = 1 + 0.8K_{d(T)} \times C_{\text{MLSS}} \times t_h \quad (8)$$

结合式(6)(7)和(8),得到改进的磷模型,见式(9):

在碳源充沛的环境中,提高磷元素的浓度,会增强聚磷菌对碳源的竞争优势,使聚磷菌释磷代谢旺盛。C/P 在 30 ~ 45 左右,除磷性能最优^[10]。TN/TP 比值区间为 5 ~ 14,平均值为 9.57,且 TN/TP > 5 的概率为 100%,表明氮、磷可满足微生物生长需要。

将进水 MLSS 划分为 3 个梯度(I、II、III),分别为 3 400 mg/L ~ 4 100 mg/L、4 100 mg/L ~ 4 800 mg/L、4 800 mg/L ~ 5 500 mg/L。梯度 I、II、III 对 TP 的平均去除率分别为 91.24%、84.10%、81.04%,梯度 I 的 TP 去除率最小值为 89.47%,高于 II、III 梯度。当 MLSS 值为 3 500 mg/L ~ 4 100 mg/L 时,聚磷菌增殖速率较高,利于在好氧区吸磷。随着 MLSS 值的提高,TP

去除率呈现先升高后下降的趋势,表明 MLSS 值达到某一极限值时,厌氧区高污泥浓度会降低聚磷菌对磷的吸收,除磷效果变差。结合出水 TP、TN 可知,低浓度的 MLSS 值对应出水 TP 较低,而出水 TN 浓度较高,二者出现反差。表明,不同的 MLSS 值对脱硝与除磷情况不同。在梯度Ⅲ,NO₃⁻-N 的去除效率明显提高;在梯度Ⅰ,TN 去除效果最差,存在不达标情况,可能是由于在初期阶段,工业污染物较多,微生物可利用的底物较低,在碳源匮乏的情况下,出水 TN 偏高。然而,对除磷的效能恰好相反,在Ⅰ阶段出水 TP 平均值高达 0.48 mg/L,最大值为 0.78 mg/L,在该 MLSS 范围内可实现一级 A 标准;在Ⅱ阶段后期出水 TP 效果不佳,可能是由于 MLSS 值过高,还有受 C/P 值的影响。

当 $T < 20$ °C 时,TP 去除率随温度的升高呈先下降后升高趋势;当 $T > 20$ °C 时,TP 去除率随温度的升高而下降。 T 越高,出水 TP 越高,易出现超标现象。 R 增大会携带部分 DO 回流至缺氧池内,且氧的溶解度会随温度的升高而降低。因此,污水中含有硝酸盐和 DO,会使反硝化菌竞争水中的溶解性有机物,减少聚磷菌可利用的有机碳源,导致其无法在细胞内合成高磷污泥。

采用 PAOMIX 探针对污水处理厂的活性污泥进行微生物镜检,发现聚磷菌占比高达 88.5%,优势菌为聚磷菌,证明污水厂活性污泥具有较好的释磷和吸磷能力,为温度模型奠定了良好的基础。常温条件下(< 20 °C),厌氧释磷和好氧吸磷速率随 T 的升高而增大;当温度为 20 °C ~ 30 °C 时,聚磷菌吸磷速率不断减小,释磷速率不断增加。在 T 升高(> 20 °C)的过程中,聚糖菌数目增加,聚磷菌减少,导致除磷效果不佳。低温环境有利于聚磷菌增殖生长,同时聚糖菌受到温度的影响和聚磷菌的制约,数量逐渐减少,易于除磷作用的进行,表明 T 是影响生物活性的直接原因。

将 HRT 划分阶段(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ),HRT 分别为 8.0 h、5.4 h、10 h,各阶段 TP 平均去除率分别为 93.28%、82.13%、79.69%,出水平均值为 0.479 mg/L、0.996 mg/L、1.123 mg/L。与Ⅱ、Ⅲ阶段相比,Ⅰ阶段出水平均值满足 2.1 中 TP 值控制范围,可达到一级 A 标准。比较Ⅱ、Ⅲ阶段发现,HRT 升高,TP 去除率不一定升高。当 HRT 升高至某一限值时,TP 去除率呈现降低的趋势,除磷性能恶化。这是由于 HRT 过大,产生污泥膨胀,在

碳源限定的条件下,硝化细菌与聚磷菌形成较为激烈的竞争,而硝化细菌的存活能力高于聚磷菌,造成聚磷菌的死亡,解体后菌体内的磷释放回水中,使水中 TP 升高。聚磷菌的世代时间低于硝化细菌,大量死亡的聚磷菌会引起高磷污泥解体^[11],而微生物的世代时间与污泥龄(SRT)有关。当 SRT 为 11 d ~ 13 d 时,系统除磷效果较好,TP 平均去除率均稳定在 85%,而为 14 d ~ 16 d 时,TP 去除率为 74.8%,除磷效果较差。这是由于 SRT 过大,高磷污泥不能及时去除,加之碳源的匮乏,出现无效释磷的现象,微生物将摄入的磷酸盐返还到水中,使出水 TP 偏高。同时,系统除磷效率与 SRT、F/M 呈现负相关性。该厂除磷过程中应控制 F/M 在 0.12 d⁻¹左右,SRT 为 11 d ~ 12 d 较适宜。

2.8 各因素对 TN 去除率的影响

进水 BOD/TN 的平均值为 3.79, BOD/TN < 4 的概率为 70.00%,分布在 4 ~ 6 的概率为 30.00%。一般来说,当 BOD/TN > 4 时,可认为进水基质碳源充足。该污水厂进水基质存在碳源匮乏的问题,微生物反硝化过程在多数情况下不能顺利完成,需要对污水厂外加碳源来强化脱氮,比如添加乙酸钠等。

进、出水 NH₃-N 最大值分别为 62.24 mg/L、11.34 mg/L,平均去除率为 88.82%,最小值为 74.87%;进、出水 TN 最大值分别为 73.26 mg/L、29.79 mg/L,平均去除率为 63.08%,最小值为 51.90%。污水厂在反硝化阶段效能较低,TN 为 NH₃-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 及有机氮之和,制约 TN 去除率的原因包括 NH₃-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N, NH₃-N 去除率均 $> 75%$,亚硝化作用较彻底。TN 超标的原因可能是 NO₂⁻-N 大量积累或者氧化阶段不彻底,在碳源匮乏和存在溶氧的情况下,反硝化菌无法完成生化反应,使 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 未被还原所致。通过调节 R 和进水基质浓度,可对污水厂脱氮加以强化。

R 是影响生物脱氮性能的因素之一。随着 R 增大,系统携带至缺氧池的 DO 也相应增加,在溶氧环境下,破坏了反硝化菌适应的生存空间,致使出水 TN 超标。同时,适当降低好氧池的溶氧浓度,能够削弱异养菌有氧呼吸对碳源的氧化,避免有机物过度消耗,为硝化液回流至缺氧池进行脱硝作用提供电子受体,在一定程度上提高强化脱氮的效能。建议将缺氧区前段进水改为中段进水,增设

内源呼吸将回流液中的 DO 消耗掉,优化缺氧环境。

3 结语

造成出水 TP 异常的因素有 C/N、T 和 HRT。HRT 分别为 8.0 h、5.4 h、10 h 时,TP 平均去除率分别为 93.28%、82.13%、79.69%,出水平均值为 0.479 mg/L、0.996 mg/L、1.123 mg/L;MLSS 值为 3 400 mg/L ~ 4 100 mg/L 时,TP 平均去除率为 91.24%,利于 TP 的去除。优化 TP 的措施是控制 HRT 为 5.4 h ~ 8.0 h,MLSS 为 3 500 mg/L ~ 4 500 mg/L,厌氧区和好氧区 DO 为 0.3 mg/L 和 2 mg/L,SRT 为 11 d ~ 12 d。C/N 区间为 4 ~ 6 概率为 30.00%,平均值为 3.79,建议外加乙酸钠。改进磷模型可用于新疆 A²/O 工艺的 TP 预测,在污水处理领域具有一定实用价值。

[参考文献]

- [1] 周慧华. 城市污水处理厂 A²/O 运行问题分析及解决方法[J]. 水处理技术,2014,40(7):129-133.

- [2] HUI C, GUO X X, SUN P F, et al. Removal of nitrite from aqueous solution by *Bacillus amyloliquefaciens* biofilm adsorption [J]. *Bioresource Technology B*, 2017, 248: 146-152.
- [3] 朱信成, 肖作义, 肖明慧, 等. 包头市城市污水水质指标的统计学分析[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(6): 686-691.
- [4] 李好, 李红萍, 孙志武, 等. 城市污水中环境雌激素的去除及环境风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2017, 34(4): 337-340.
- [5] 樊杰, 曹亮, 高乘, 等. 基于统计学分析的污水厂运行性能诊断[J]. 工业水处理, 2020, 40(7): 98-102.
- [6] 韩微, 雷志超, 韩蕊敏, 等. 响应面法优化实际污水厂的除磷过程[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2968-2973.
- [7] CHATTERJEE S, HADI A S, PRICE B. 例解回归分析[M]. 3版. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [8] 吕娟. NO₂⁻-N、MLSS 对反硝化脱氮除磷的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 207-210.
- [9] 李淑芝, 卜平宇. 用阿累尼乌斯方程推导温度对化学平衡常数的影响[J]. 辽宁教育学院学报, 1997(5): 91-92.
- [10] MAJED N, GU A Z. Phenotypic dynamics in polyphosphate and glycogen accumulating organisms in response to varying influent C/P ratios in EBPR systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 743: 140603-140604.
- [11] 何炎焱, 李能树, 刘慧, 等. 污水处理厂微生物生态分布初探[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(1): 64-66.

本栏目编辑 吴珊

(上接第 59 页)

不同浓度水平的颗粒物标准样品的测量结果分析,表明颗粒物浓度越高,该方法的精密度和准确度越好。将该方法与重量法对比发现,两种方法测定结果变化趋势一致,且颗粒物浓度越高,两种方法相对偏差越小,一致性越高。研究结果表明,β射线法适用于固定污染源废气中颗粒物浓度的测量,颗粒物浓度越高,测量结果越可靠,对于颗粒物浓度低的排放口可采用增加检测次数、适当改变测量量程等方法,尽量避免测量过程中挥发性颗粒物的损失,使测量结果更加可靠。

[参考文献]

- [1] 周敬文, 崔亮亮, 张林东, 等. 济南市 2013—2015 年某综合医院呼吸系统疾病就诊人次与大气颗粒物 PM₁₀、PM_{2.5} 关系的时间序列研究[J]. 中华流行病学杂志, 2017, 38(3): 374-377.
- [2] 魏文国, 曾三武. 大气颗粒物对人体皮肤健康影响的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2017, 34(6): 552-554.
- [3] 周亮, 陈剑宇, 鹿茸, 等. 成都市区大气细颗粒物短期暴露对小学生肺功能的影响[J]. 现代预防医学, 2018, 45(2): 224-227.
- [4] 马洪群, 崔莲花. 青岛市大气细颗粒物对呼吸系统疾病患者

- 住院影响的病例交叉研究[J]. 职业与健康, 2017, 33(7): 961-964.
- [5] 柯慧敏, 卢春艳, 卢源, 等. 固定污染源废气中低浓度颗粒物测定方法应用中问题的探讨[J]. 浙江化工, 2018, 49(6): 49-51.
- [6] 周小棠. PM_{2.5} 挥发性颗粒物补偿测量装置的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2017.
- [7] 陈芳, 陈峰, 余华, 等. β射线法与重量法监测环境空气 PM_{2.5} 的应用比较[J]. 环境工程, 2017, 35(8): 146-151.
- [8] 赵政. 基于β射线法的烟尘浓度直读检测技术及实验[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(3): 46-50.
- [9] 白晓亮, 赵利. 探讨β射线法颗粒物在线监测仪与手工采样器比对测试[J]. 山西化工, 2017, 37(3): 44-46.
- [10] 环境保护部. 固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法: HJ 836—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 杨志远, 赵修良, 刘丽艳, 等. β射线式 PM_{2.5} 测量仪的挥发性颗粒物补偿方案设计[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2014(3): 17-21.
- [12] 李德文, 惠立锋, 吴付祥. 基于主成分分析的β射线法 PM_{2.5} 测量准确性影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(5): 56-59.
- [13] 董晶晶, 陆晓波, 杨丽莉, 等. PM_{2.5} 中金属元素在线监测与滤膜采集-实验室检测比对[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(4): 55-57.

本栏目编辑 吴珊