

我国城镇污水处理厂运行药耗分析

张 维¹, 颜秀勤¹, 张 悦², 孙永利¹, 刘 静¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 住房和城乡建设部 城镇水务
管理办公室, 北京 100835)

摘 要: 随着我国城镇污水处理规模的不断扩大和排放标准的不断提高, 外部碳源、除磷药剂以及脱水药剂等药耗对污水处理厂运行成本的影响不容忽视。通过对“全国城镇污水处理信息管理系统”数据的分析可知, 全国范围内投加外碳源、除磷药剂和脱水药剂的污水处理厂比例分别占6%、35%和76%。季节变化和排放标准对外部碳源和除磷药剂的投加影响明显, 温度降低时碳源投加厂数量和投加量都会增加, 而较低或较高的温度条件下除磷药剂投加量有升高的趋势, 执行一级A、一级B、二级标准的污水处理厂的碳源投加量分别为23.28、18.90和16.60 mg/L, 除磷药剂投加物质的量之比分别为2.36、2.01和1.95。脱水药剂聚丙烯酰胺(PAM)的月均投加量均在7 kg/tDS上下波动, 总体上, 污水处理厂规模越大, 单位投加量越小, 规模在 $(10 \sim 20) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时投加量最为经济。此外, 污泥性质和脱水方式对PAM投加量也有影响。

关键词: 城镇污水处理厂; 运行药耗; 化学碳源; 除磷药剂; 聚丙烯酰胺

中图分类号: X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)04-0103-06

Analysis of Chemicals Consumption in Urban Sewage Treatment Plants in China

ZHANG Wei¹, YAN Xiu-qin¹, ZHANG Yue², SUN Yong-li¹, LIU Jing¹

(1. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Urban Water Resources Management Office, Ministry of Housing and Urban Rural Development of China, Beijing 100835, China)

Abstract: With the continuous expansion of the scale of urban sewage treatment and continuous improvement of discharge standards in China, the impact of external carbon sources, phosphorus removal chemicals and sludge dewatering agents on operation cost of treatment plants must be considered. The data of chemicals consumption collected from national urban sewage treatment information management system were analyzed, and the results showed that the proportion of plants using external carbon source, phosphorus removal chemicals and dewatering agents accounted for 6%, 35% and 76%, respectively. The effect of seasonal variation and discharge standards on the external carbon source and phosphorus removal chemicals was obvious. Decrease in temperature could lead to increase in the number of treatment plants using external carbon source and dosage of carbon source, and there was an increasing trend of phosphorus removal chemicals dosage in lower or higher temperature conditions. Carbon source dosages of the treatment plants enforcing the first level A criteria, the first level B criteria and the second level criteria were 23.28 mg/L, 18.90 mg/L and 16.60 mg/L, while their amount of substance ratios of phosphor-

us removal chemicals were 2.36, 2.01 and 1.95, respectively. Monthly average dosage of polyacrylamide (PAM) was around 7 kg/tDS. Generally speaking, the larger the scale, the smaller the dosage, when the scale was $(10 \text{ to } 20) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, the dosage of PAM was lowest. In addition, the nature of sludge and the way of dewatering also affect on the dosage of PAM.

Key words: urban sewage treatment plant; chemicals consumption; chemical carbon source; phosphorus removal chemicals; polyacrylamide (PAM)

近几年,我国城镇污水处理规模快速增长,污水处理厂排放标准也有较大提升。城镇污水处理厂一级A提标改造及再生水利用成为我国“十二五”乃至未来一段时期内重要的市政设施建设内容之一。我国大部分城镇污水处理厂进水碳氮比偏低,且由于降雨量、用水量等因素影响,南方地区城镇污水COD浓度明显低于北方地区^[1],为了达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A及更高的排放标准,对许多污水处理厂而言,单纯依靠生物系统实现脱氮除磷已不能满足要求,投加外部碳源、除磷药剂成为必要的稳定达标关键措施。

一般来说,包括外部碳源、除磷药剂、脱水药剂、消毒药剂等在内的药剂费大约占污水处理厂运行成本的10%^[2,3]。排放标准的提高必然导致污水处理厂运行药耗的增加,进而会对污水处理厂的运行成本带来一定压力。目前,国内对运行能耗及节能措施方面的研究较多,而运行药耗的分析探讨则涉及较少。

为了解我国城镇污水处理厂处理药剂的使用状况,以住房和城乡建设部的“全国城镇污水处理信息管理系统”(以下简称“信息系统”)内近4 000座污水处理厂的运行数据为基础,对我国城镇污水处理厂外加碳源、除磷药剂、脱水药剂的投加情况进行统计分析,亦可使污水处理厂了解自身的药耗水平和降耗空间,改善运营,提升效率。

1 碳源的使用现状分析

1.1 投加碳源情况

现阶段,我国90%以上的城镇污水处理厂采用生物处理工艺。为了满足高排放标准,大多数新建厂和提标改造厂的二级处理工段选用了A²/O(A/O)、氧化沟、SBR等脱氮除磷工艺,有些厂的深度处理段还增加了反硝化滤池来保证总氮的去除效果。当进水中碳源不足时,大多数污水处理厂会选择在不同位置投加碳源来提高系统的脱氮除磷能力。此

外,有些污水厂由于进水中工业废水比例较高,为了促进微生物的生长繁殖也会投加碳源。

信息系统数据统计结果显示,在约3 880座城镇污水处理厂中,6%左右的城镇污水处理厂投加了碳源,其中,使用甲醇、葡萄糖、乙酸、乙酸钠这四种化学碳源的厂约占80%,具体投加情况见表1。由于其他碳源种类较杂且无明确固定的COD当量,故只对采用以上四种常用化学碳源的污水厂进行投加量方面的数据分析,分析时考虑了有效成分含量。

表1 我国城镇污水处理厂碳源投加情况

Tab.1 Carbon source dosage of urban sewage treatment plants in China %

项 目	投加厂数量占比	投加厂规模占比
葡萄糖(1.07)	28.03	12.70
乙酸钠(0.78)	24.80	40.45
甲醇(1.50)	15.32	23.34
乙酸(1.07)	11.24	11.45
其他(—)	20.61	12.06

1.2 碳源投加量分析

以2014年7月—2015年6月的数据进行统计分析得出,碳源的投加具有较明显的季节性特征,具体月投加量变化见图1。

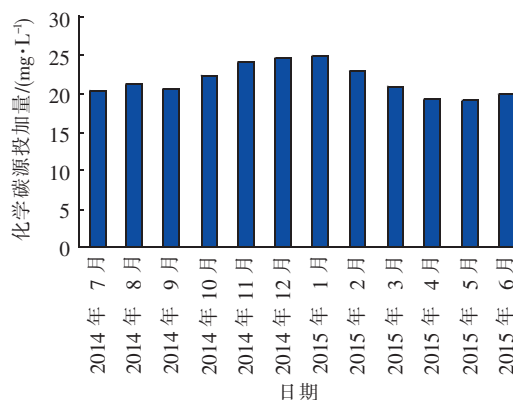


图1 2014年7月—2015年6月碳源月均投加量变化

Fig.1 Variation of carbon source average monthly from July 2014 to June 2015

在秋冬季节,由于低温对微生物活性的影响,

导致 2014 年 10 月—2015 年 2 月投加量较高,投加碳源的污水厂数量也有所增加,1 月份投加量最高,平均值达到 25.21 mg/L。随着温度的升高,生物系统脱氮性能逐渐恢复,碳源投加量相应降低,投加碳源的厂数也随之减少。

碳源月平均投加量的累计频率分布规律相似。以 2015 年 1 月和 6 月全国城镇污水处理厂碳源投加数据为例,具体投加量分布如图 2 所示。

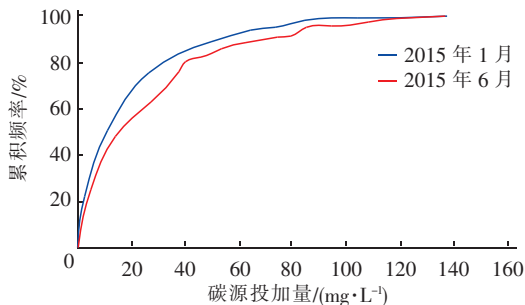


图 2 2015 年 1 月和 6 月碳源投加量分布

Fig. 2 Distribution of carbon source dosage in January and June 2015

从图 2 可知,投加碳源的污水处理厂中,1 月和 6 月碳源投加量 < 10 mg/L 的分别约占 41% 和 47%,投加量在 $10 \sim 60$ mg/L 的分别约占 47% 和 46%,其中超过 30 mg/L 的分别约占 33% 和 22%。

从上述全年数据来看,投加以上四种碳源的污水处理厂中,执行一级 A 排放标准的厂最多,约占投加厂总数的 52%,其次是执行一级 B 标准的厂,约占投加厂总数的 34%,另有约 8% 执行二级排放标准的厂信息系统数据显示也投加了碳源。执行一级 A、一级 B 和二级排放标准的污水厂碳源平均投加量分别为 23.28、18.90、16.60 mg/L。可见,执行的排放标准越高,选择投加碳源的可能性就越大,投加量也越高。

污水厂进水 BOD_5/TN 比值是影响生物脱氮的关键因素,根据理论及运行经验, $BOD_5/TN < 3.0$ 的污水厂可认为碳氮比偏低,要有充足的碳源用于生物脱氮则一般需要 $BOD_5/TN > 4.0$ 。从投加碳源厂进水水质分析可知,约 55% 的厂进水 $BOD_5/TN < 3.0$, $BOD_5/TN > 4.0$ 的厂仅占 23.6%。随着进水 BOD_5/TN 的升高,碳源投加量有降低的趋势。

2 除磷药剂的使用现状分析

2.1 投加除磷药剂情况

目前,我国城镇污水处理厂已将化学除磷作为

保障高排放标准下总磷稳定达标的必备手段。根据不完全统计,我国 35% 以上的城镇污水处理厂采用了化学除磷,占到工程总规模的 45%。使用较多的除磷药剂有聚合氯化铝、聚合硫酸铁、硫酸铝、三氯化铁、聚合氯化铝铁、硫酸亚铁、聚合氯化铁、氧化钙等,其中,投加前五种药剂的污水处理厂最多,无论数量或是规模上占比均超过 90%,具体见表 2。以下针对投加量的统计分析仅包含表 2 中列出的五种药剂。

表 2 我国城镇污水处理厂除磷药剂投加情况

Tab. 2 The dosage of phosphorus removal agent in urban sewage treatment plants in China %

项 目	投加厂数量占比	投加厂规模占比
聚合氯化铝	68.85	61.08
聚合硫酸铁	10.97	10.36
硫酸铝	5.32	10.67
三氯化铁	4.28	5.74
聚合氯化铝铁	2.95	6.78
其他	7.63	5.37

2.2 除磷药剂投加量分析

为了比较除磷药剂投加的情况,采用物质的量之比的概念,即所投加的化学除磷药剂中铁、铝等金属物质的量与所需化学去除 TP 物质的量的比值。为统一核算并简化计算,其中“所需化学去除 TP 物质的量”按所有非生物合成类 TP 去除量计算,即污水处理厂进水 TP 量扣除出水 TP 和生物合成类 TP 量。

2014 年 7 月—2015 年 6 月我国城镇污水处理厂除磷药剂物质的量之比变化如图 3 所示。

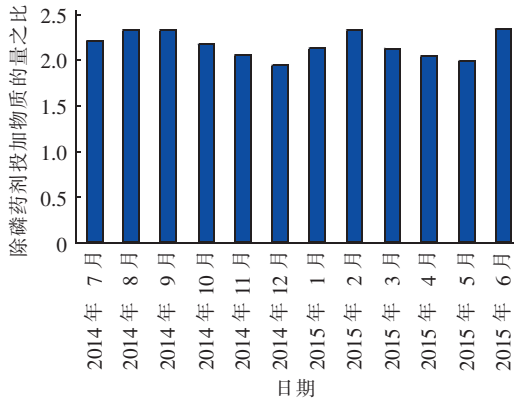


图 3 2014 年 7 月—2015 年 6 月除磷药剂月均物质的量之比变化

Fig. 3 Monthly average molar equivalent change of phosphate removal agent from July 2014 to June 2015

从图3可知,除磷药剂月均物质的量之比在1.9~2.4之间,夏季和冬季较高,平均在2.3以上。这可能与温度的变化有关,唐旭光等^[4]的研究结果表明,温度较低($<10\text{ }^{\circ}\text{C}$)或较高($>30\text{ }^{\circ}\text{C}$)都不利于生物除磷的进行,故此时化学除磷药剂的使用量增加。

除磷药剂月平均投加量的累计频率分布规律非常相近。以2015年6月的统计结果为例(如图4所示),56%的城镇污水处理厂的除磷药剂物质的量之比超过1,将近23%的污水处理厂超过3,月均物质的量之比为2.33。理论上讲,去除1 mol的磷需要投加1 mol的铝或铁,但实际上,由于受到多种因素影响,反应并不能百分之百有效进行,故物质的量之比会达到2~3甚至更高。

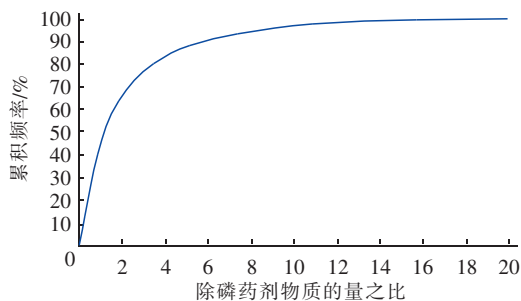


图4 2015年6月除磷药剂物质的量当量累积分布

Fig.4 Cumulative distribution of phosphorus removal agents in June 2015

从上述全年数据来看,投加以上五种除磷药剂的污水厂中,执行一级A和一级B排放标准的污水厂数量相差不多,总计占86.5%,而执行二级标准的占8.3%。显而易见,执行的排放标准越高,需要投加除磷药剂的可能性就越大,同时投加量也增加,出水水质执行一级A、一级B和二级标准的污水处理厂投加的除磷药剂平均物质的量之比分别为2.36、2.01、1.95。

采用SBR、氧化沟、 A^2/O 、 A/O 工艺的污水处理厂除磷药剂的投加量稍有差别,平均物质的量之比分别为1.56、1.90、1.96、2.20。这可能与后两种工艺更多地被处理标准要求较高的一级A污水处理厂所采用有关。

3 污泥脱水药剂的使用现状分析

3.1 脱水药剂投加情况

为了满足城镇污水处理厂脱水污泥含水率 $<80\%$ 的要求,便于后续的运输及最终处置,污泥在进

行脱水处理前,一般都需要进行加药调理以改善其脱水性能。信息系统显示,76%的污水处理厂填报了脱水药剂投加情况,其中95%的厂选择投加聚丙烯酰胺(PAM),故以下只对投加PAM的厂进行数据分析,分析计算时考虑了药剂的有效成分含量。

3.2 PAM投加量分析

2014年7月—2015年6月PAM月均投加量变化如图5所示。统计数据显示,全年月均PAM投加量均在 7 kg/tDS 上下波动,2月份投加量最高,为 7.43 kg/tDS 。总体来看,季节变化对PAM投加量的影响不大。

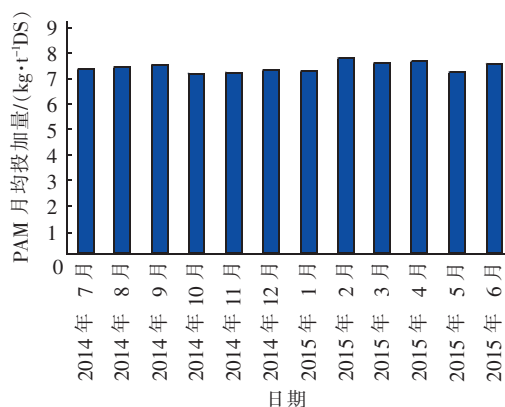


图5 2014年7月—2015年6月PAM月均投加量变化

Fig.5 Changes in PAM monthly dosing from July 2014 to June 2015

2015年6月我国城镇污水处理厂PAM投加量分布如图6所示。从统计结果可知,75%的污水处理厂每吨干污泥PAM投加量超过 3 kg/tDS ,44%的污水处理厂超过 5 kg/tDS 。

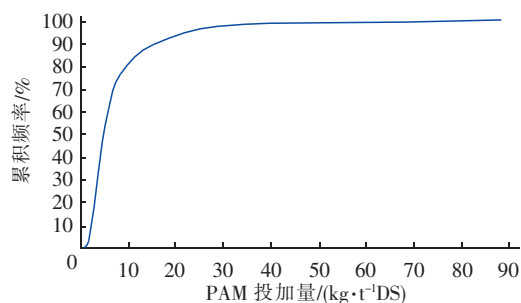


图6 2015年6月PAM投加量分布

Fig.6 Distribution of PAM dosage in June 2015

不同工程规模污水处理厂的PAM投加情况如图7(图中 a 代表工程规模)所示。从图7可知,小规模污水处理厂($\leq 1 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)的PAM投加量较高;工程规模 $\leq 20 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时,脱水药耗的规模效

益明显,随着处理规模的增大,PAM 投加量逐渐降低,污水处理规模在 $(10 \sim 20) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时投加量最少;当工程规模 $> 50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,PAM 投加量又有随规模增大而升高的趋势。总体来看,大规模污水处理厂的脱水药耗低于小规模污水处理厂。因此,在条件允许的情况下将污泥集中脱水处理,有利于减少脱水药剂消耗,降低污泥处理费用。

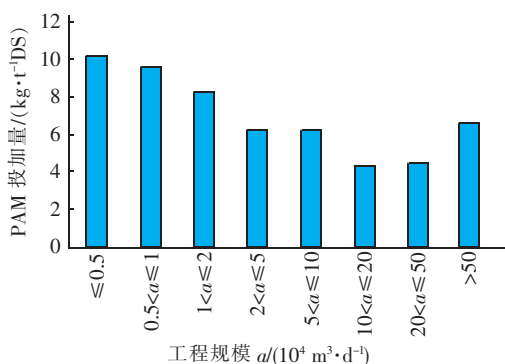


图 7 不同工程规模污水处理厂 PAM 投加量

Fig. 7 The dosage of PAM in different scale sewage treatment

PAM 投加量与污泥性质、脱水方式密切相关,统计数据分析也证明了这一点(见表 3)。结果显示,消化污泥的 PAM 投加量明显高于未经消化处理的污泥,这与程洁红、裴海燕等人^[5,6]的研究结果是一致的,不论是好氧消化还是厌氧消化,都会导致消化污泥的脱水性能变差,从而使调理药剂增加。不过,统计数据中的“好氧消化”和“厌氧消化”大部分可能并非是有单独污泥处理设施的污泥消化,而可能仅是污泥脱水前设置了较长停留时间的普通污泥好氧池或厌氧池,但也表现出了与消化污泥相似的污泥脱水特征。在脱水方式的影响方面,板框压滤的 PAM 投加量最高,带式压滤次之,离心脱水最低。目前,我国 60% 的城镇污水处理厂采用带式压滤机,而离心脱水机具有结构紧凑、运行环境好、维护方便等优点,在我国的应用逐渐增多。采用板框压滤机更多的是应对较高的脱水污泥含固率。

表 3 不同性质污泥与不同脱水方式 PAM 的投加量

Tab. 3 Dosage of PAM with different sludge and different dewatering method $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1} \text{DS}$

污泥性质	PAM 投加量	脱水方式	PAM 投加量
好氧消化	9.35	离心浓缩	6.27
厌氧消化	8.24	带式压滤	7.30
未消化	6.53	板框压滤	7.50

从表 3 可见,无论哪种处理方式,实际运行中每

吨干污泥 PAM 的投加量都较高,偏向于设计手册 1 ~ 10 kg/t 的上限值^[7],高于文献[8]中提到的离心浓缩脱水干聚合物投加量 0 ~ 4 kg/t 干固体,带式压滤干聚合物投加量 3 ~ 7 kg/t 干固体。

4 结论与建议

① 我国 6% 的城镇污水处理厂投加了外碳源,使用葡萄糖、乙酸、乙酸钠、甲醇此四种化学碳源的厂占 80%;35% 以上的城镇污水处理厂采用了化学除磷,使用聚合氯化铝、聚合硫酸铁、硫酸铝、三氯化铁、聚合氯化铝铁此五种除磷药剂的厂占 92%;76% 的城镇污水处理厂投加了脱水药剂,采用 PAM 的厂占 95%。

② 污水处理厂碳源的投加具有比较明显的季节性特征,秋冬季节投加碳源的污水厂增多,月均投加量也从夏季的 20.64 mg/L 升高到冬季的 24.38 mg/L ;投加上述四种碳源的污水处理厂中,86% 的污水厂执行一级排放标准,执行一级 A、一级 B、二级排放标准的污水厂平均投加量分别为 23.28、18.90、16.60 mg/L ;76.4% 的污水厂进水 $\text{BOD}_5/\text{TN} < 4.0$,碳源投加量随进水碳氮比的增加有降低的趋势。

③ 我国城镇污水处理厂除磷药剂投加月均物质的量之比变化范围为 1.9 ~ 2.4,温度较高或者较低时除磷药剂的投加量会有所增加。以 2015 年 6 月数据为例,56% 的污水处理厂除磷药剂月均物质的量之比超过 1,近 23% 的污水处理厂超过 3;投加上述五种除磷药剂的污水厂中有 86.5% 出水水质执行一级排放标准,执行一级 A、一级 B 和二级排放标准的污水处理厂除磷药剂平均物质的量之比分别为 2.36、2.01、1.95。

④ 季节变化对污泥脱水 PAM 投加量的影响不大,全年月均 PAM 投加量均在 7 kg/tDS 上下波动;以 2015 年 6 月数据为例,75% 的污水处理厂干污泥 PAM 投加量超过 3 kg/tDS ,44% 的污水处理厂超过 5 kg/tDS ;总体上,污水处理厂规模越大,单位投加量越小,污水处理规模在 $(10 \sim 20) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时投加量最为经济;污泥消化后脱水性能变差,导致 PAM 投加量增加;三种采用较多的脱水方式 PAM 投加量高低顺序为板框压滤 > 带式压滤 > 离心浓缩。

⑤ 无论是与理论值还是参考文献中的经验值相比,我国城镇污水处理厂整体药耗都偏大,以除磷

药剂和脱水药剂为例,对许多污水处理厂而言都有较大的降耗空间。

参考文献:

- [1] 郑兴灿. 城镇污水处理厂一级 A 稳定达标技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [2] 何志强,谢满俊,郭怡雯. 污水处理成本及节约途径分析[J]. 资源节约与环保,2012,(2):47-51.
- [3] 原培胜. 污水处理厂运行成本分析[J]. 环境科学与管理,2008,33(1):107-109.
- [4] 唐旭光,王淑莹,张婧倩. 温度变化对生物除磷系统的影响[J]. 化工学报,2011,62(4):1103-1109.
- [5] 程洁红,俞清,朱南文,等. 高温好氧消化对不同类型污泥的脱水性能影响[J]. 中国给水排水,2006,22(5):24-29.
- [6] 裴海燕,胡文容,李晶,等. 活性污泥与消化污泥的脱水性能及粒径分布[J]. 环境科学,2007,28(10):2236-2242.
- [7] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册(第5册):城镇排水(第2版)[M]. 北京:中国建筑

工业出版社,2007.

- [8] Metcalf & Eddy Inc. Wastewater Engineering Treatment and Reuse(第4版)[M]. 北京:清华大学出版社,2003.



作者简介:张维(1983-),女,河北廊坊人,硕士,工程师,从事城镇排水和污水处理技术研究工作。

E-mail:chinaweiyi1983@163.com

收稿日期:2016-05-11

(上接第95页)

56-58.

- [5] 藏小丹,牟光庆. 气相色谱法同时测定大豆中多种除草剂的残留[J]. 食品研究与开发,2010,31(3):132-134.
- [6] 马婧玮,李萌,马欢,等. SPE 净化-GC(NPD)测定土壤及玉米中莠去津残留量[J]. 分析实验室,2011,30(7):75-78.
- [7] 马金凤,刘雪,赵志强,等. 凝胶渗透色谱-气相色谱质谱法测定花生中6种除草剂农药残留[J]. 化学分析计量,2012,21(4):43-46.
- [8] 闫蕊,邵明媛,鞠福龙,等. 加速溶剂萃取-高效液相色谱串联质谱法测定土壤中农药残留[J]. 分析化学,2013,41(2):315-316.
- [9] 赵琳,张晓波,任红波,等. 在线 GPC-气相色谱-质谱联用测定玉米中莠去津、乙草胺和2,4-滴丁酯残留[J]. 农药科学与管理,2013,34(5):35-39.



作者简介:卞战强(1981-),男,河南沈丘人,硕士,副研究员,从事环境卫生学和分析化学研究。

E-mail:bianzhan2008@126.com

收稿日期:2016-04-29