不同填料处理污染河水的挂膜启动及抗冲击负荷性能

李 青[1,2]，成小英[*1,2]

（1. 江南大学 环境与土木工程学院，江苏 无锡 214122；2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心，江苏 苏州 215000）

摘要：为了比较悬浮填料和弹性填料的挂膜启动过程及抗冲击负荷能力，研究了接种河流底泥的两组生物膜反应器的挂膜速度以及不同水力停留时间下处理污染河水的效率。结果表明，悬挂弹性填料的生物膜反应器的 NH_4^+-N 去除率比填充悬浮填料的生物膜反应器提前 4 d 挂膜成熟，挂膜成熟后两组反应器的 NH_4^+-N 和 COD_{Mn} 去除率均分别稳定在 97%和 80%以上；随着水力停留时间由 14.80 h 缩短至 7.99 h，两组反应器 NH_4^+-N 平均去除率分别由 98.18%、98.76%降至 78.32%、87.63%，COD_{Mn} 平均去除率分别由 84.52%、83.69%降至 60.90%、64.71%；不同水力停留时间下弹性填料附着的生物膜具有更高的活性生物量，且生物膜镜检显示其生物膜结构更为致密；这说明，与悬浮填料相比，弹性填料在处理污染源水时能更快的实现挂膜启动并且具有较强的抗冲击负荷能力。

关键词：不同填料；生物膜反应器；去除率；抗冲击负荷能力

中图分类号：X 703　**文章编号**：1673-1689(2019)07-0128-06　**DOI**：10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.07.018

Effects of Biofilm Carriers on Start-Up and the Adaptability to the Shock Load of Bioreactors of Micro-Contamination River Water

LI Qing[1,2]，*CHENG Xiaoying*[*1,2]

（1. School of Environment and Civil Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center in Jiangsu Province，Suzhou 215000，China）

Abstract：In order to compare the start-up period and the adaptability to the shock load of two lab-scale bioreactors of two kinds of materials employed as biofilm carrier inoculated sediments of river，the biofilm forming rate and the efficiencies of treating polluted river water at four different hydraulic retention time（HRT）were studied. The experimental results showed the startup speed of bioreactor filled with elasticity plastic was more rapid compared to the bioreactor filled with suspend packing，reducing the start-up period for its earlier maturation in removing NH_4^+-N；In the steady

收稿日期：2016-12-18

基金项目：国家科技重大专项项目(2017ZX07203-003-05)。

* **通信作者**：成小英(1977—)，女，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事水体污染治理工程及其机理方面的研究。

E-mail：chengxiaoying@163.com

引用本文：李 青，成小英. 不同填料处理污染河水的挂膜启动及抗冲击负荷性能[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(07)：128-133.

running stage,the removal efficiencies of NH_4^+-N and COD_{Mn} in two bioreactors both reached 97% and 80% respectively;The average removal efficiency of ammonia nitrogen dropped from 98.18%, 98.76% to 78.32% ,87.63% respectively,the average removal efficiency of COD_{Mn} dropped from 84.52% ,83.69% to 60.90% ,64.71% respectively with hydraulic retention time (HRT) shortened from 14.80 h to 7.99 h;The biofilm attaching on elasticity plastic filler has higher activity at four different hydraulic retention time (HRT) and the examination showed more impacted structure within biofilm attaching on elasticity plastic than the biofilm attaching on suspend packing at hydraulic retention time of 7.99 h;which showed the startup speed of elasticity plastic was more rapid compared to suspend packing and elasticity plastic filler had a stronger resistance to impact load than suspend packing in river water treatment.

Keywords: two kinds of materials,bioreactors,removal efficiencies,the adaptability to the shock load

目前,我国地表水中氮污染现象普遍存在[1],且氮素是引起水体富营养化和环境污染的重要污染物质[2]。由于城市居民生活污水和工厂工业废水的大量排放以及农业上化肥的大量使用,使得地表水中氮污染现象愈演愈烈。有关资料表明,我国大部分湖泊和河库均处于富营养化水平,其中富营养化比较严重的湖泊高达 22%,因此富营养化问题仍然是我国湖泊治理中的长期而严峻的一个重大环境问题。水体富营养化程度的加重,蓝藻水华频繁发生,给环境和经济均造成了严重的威胁[3]。无锡市滨湖区蠡河作为太湖的入湖河流之一,其严重的氮污染问题进一步加重了太湖水域的氮污染现象。因此,蠡河氮污染治理丞待解决。

生物填料作为微生物附着的载体对系统的处理效果和稳定运行具有重要影响,国内外学者研究较多[4-6],将填料引入生物脱氮反应器,使其具有脱氮除磷和抗冲击负荷的性能[7]。同时生物膜可以通过减少功能微生物如较为脆弱的硝化细菌的流失,以提高反应器内功能微生物的丰度和种类,从而使得硝化反应顺利进行;另一方面当生物膜达到一定厚度时,其表面到内部溶解氧浓度不同,可发生同步硝化反硝化现象,从而强化系统的脱氮效果[8]。

作者在调查分析 2014 年蠡河水质的基础上,接种无锡市滨湖区蠡河底泥,选用应用范围较广且价格便宜的悬浮填料和弹性填料,对比分析了填充不同填料的两组反应器的启动过程及其抗冲击负荷能力,并从生物相的微观层面分析了其作用机理,为生物膜载体的选择和优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

运用自行设计的生物反应器(有效容积为 6.75 L 的圆柱状),分别填充 50%~60%的悬浮填料和弹性填料,并接种无锡市滨湖区蠡河底泥(以下简称 R1 和 R2),采用增氧泵向反应器内曝气,一方面对反应器内的微生物供氧,另一方面保证反应器内悬浮填料的充分悬浮,间曝期间填充悬浮填料的生物反应器采用搅拌器搅拌以保证固液充分混合。

1.2 填料类型及布设方式

实验所用的悬浮填料和弹性填料均为无锡诚泰环保科技有限公司购买。悬浮填料为聚氯乙烯柱状粒料,曝气期间在反应器内呈流化状态,弹性填料由直径 4 mm 耐腐中心绳串接,填料串自然下垂,固定于反应器上方,填料性质见表 1。

表 1 填料性质

Table 1 Properties of two fillers

填料类型	填料高度或直径/mm	丝径/mm	密度/(kg/cm³)	比表面积/(m²/cm³)	孔隙率/%
悬浮填料	25	10	950	500	>95
弹性填料	150	0.5	2.0	310	>99

1.3 实验用水

试验用水根据前期调查的2014年无锡市滨湖区蠡河水质，配制了模拟污染河水，其NH_4^+-N、NO_3^--N、TN、COD_{Mn}分别为0.37~6.80、0.70~2.25、0.92~7.70、4.49~15.86 mg/L,该水质属五类水以上。

1.4 接种底泥与运行方式

接种底泥取自无锡市滨湖区蠡河底泥,接种底泥经洗涤和0.45 mm过筛后与蒸馏水按一定比例混合后投加到反应器内,以减少其他因素对生物膜去除性能的影响。试验采用3小时/3小时间歇曝气、逐步增加进水流量的闷曝排泥法运行反应器,具体运行方式为:1）闷曝期间曝气量维持在3 L/min,2 d后将泥水全部排出;2）第三天开始连续进水,直到第九天,期间HRT恒定为24 h,曝气量维持在2 L/min;3）10~18 d内进水流量逐渐增加直至HRT缩短至14.80 h，稳定运行一段时间后，缩短HRT至11.9、9.89、7.99 h并分别持续10 d，直至反应器运行结束,曝气量始终维持在3 L/min。采用鱼缸加热棒控制反应器温度为（28±1）℃,$NaHCO_3$溶液调节pH在7.5~7.8之间。

1.5 分析项目与方法

NH_4^+-N、COD_{Mn}、NO_2^--N、TN等均按照《水和废水监测分析方法》标准方法进行测定[9];pH值:梅特勒托利多pH计直接测定;DO值：梅特勒托利多溶氧仪直接测定；生物膜镜检和结构分析采用Leica DMLB显微镜和XL-30-ESEM型(Philips公司)。

2 结果与讨论

2.1 挂膜启动过程氨氮去除性能

图1为生物膜反应器启动与运行过程中NH_4^+-N去除性能。由图1可知,根据NH_4^+-N去除情况挂膜启动大致可分为适应期、快速增长期和稳定期3个阶段[10]。在挂膜过程中,采用闷曝排泥法挂膜启动的两组反应器的NH_4^+-N去除率呈现出明显差异,R2反应器的去除率始终高于R1反应器的去除率,在进水第12天,R2反应器的NH_4^+-N去除率达到92.66 %,至此认为在该温度下反应器已挂膜成功[11-12]。而此时R1反应器的NH_4^+-N去除率仅为65.69%,4 d后增至87.74%，至此两组反应器NH_4^+-N出水均达到《地表水环境质量标准》(GB-3838-2002)[13]的Ⅱ类标准。在改变水力停留时间研究各系统的抗冲击负荷能力时,随着HRT由14.80 h缩短至7.99 h,两组反应器NH_4^+-N去除率均有不同程度的下降和波动。其中R1反应器的NH_4^+-N平均去除率波动较大,NH_4^+-N平均去除率由98.18 %降至78.32 %,而R2反应器的NH_4^+-N平均去除率由98.76%降至87.63 %，即使在HRT为9.89 h时,R2反应器的NH_4^+-N平均去除率依然维持在94.23%,见图2。

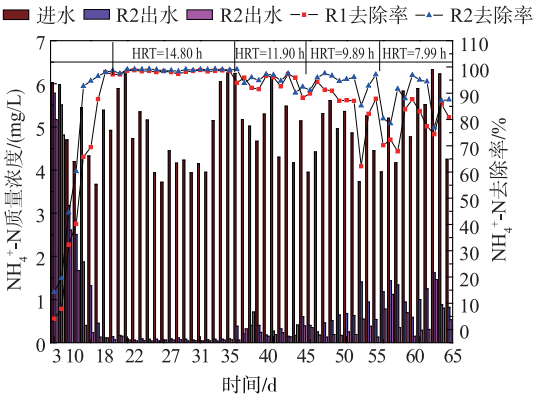


图1 脱氮反应器NH_4^+-N去除性能

Fig. 1 Removel performance of NH_4^+-N in two nitrogen removel bioreactors

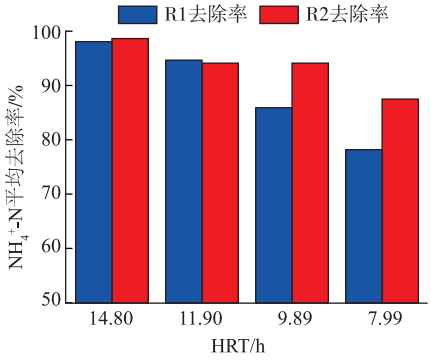


图2 不同HRT时各反应器对NH_4^+-N的平均去除率

Fig. 2 Average removal of NH_4^+-N at four different hydraulic retention time(HRT)

分析认为,缩短水力停留时间,系统进水负荷增加，生物膜表面污染物的更新速度进一步加快,使得微生物与污染物之间没有充足的接触机率与反应时间，使得反应系统的NH_4^+-N去除性能下降[14];同时,进水负荷的提高促进了异养菌和硝化细菌对生存空间的竞争[15],所以随着HRT的逐渐缩短,两组反应器NH_4^+-N去除率均有所下降，水力停留时间较长，有利于延长生物膜与污染物的接触时间,从而促进污染物的高效降解。另外,每个不同的水力停留时间下,R2反应器NH_4^+-N的平均去除率相

比 R1 反应器 NH_4^+–N 的平均去除率较高一些,原因在于弹性填料丝条能长期在水中保持辐射状,这样一来微生物附着空间大,单位填料附着的生物量较多,且对上升气泡的切割性能好,有助于布气配水均匀,从而提高了氧气的利用率,且氨氧化细菌较为脆弱和容易流失[16],而弹性填料可以较好地将氨氧化细菌吸附并将其固定以防止其流失;悬浮填料虽然比表面积也大,但由于间曝期间搅拌器的搅拌,使得附着的生物膜大部分都集中在填料内侧,生物膜也略有脱落现象,致使膜较薄,所以降低了悬浮填料的使用面积,另外曝气过程中填料的堆叠现象也影响了填料与污水的接触面积。

2.2 挂膜启动过程 COD_{Mn} 去除性能

在连续运行期间,两反应器进水及出水 COD_{Mn} 的变化情况见图 3。由两反应器对 COD_{Mn} 的去除情况可以看出,在连续运行的前 14 天,两反应器 COD_{Mn} 的去除率逐渐增加,在进水第 14 天时,R2 反应器的 COD_{Mn} 去除率达到了 85.12%,14 d 以后其 COD_{Mn} 去除率逐渐趋于稳定,而此时 R1 反应器的 COD_{Mn} 去除率刚增至 80%以上,4 d 后其去除率增至 84.31%,之后其 COD_{Mn} 去除率逐渐趋于稳定,同 NH_4^+–N 去除率一样,与 R1 反应器的 NH_4^+–N 去除率相比,R2 反应器的 COD_{Mn} 去除率率先达到稳定,此外,当 HRT 在 9.89~14.80 h 变化时,两反器的 COD_{Mn} 去除率差别不大,其 COD_{Mn} 的平均去除率均在 75% 以上,当 HRT 降到 7.99 h 时,两反应器对 COD_{Mn} 的平均去除率降到了 60%~65%之间。可见,HRT 过短同样也会影响 COD_{Mn} 的去除率,而且,当 HRT 为 7.99 h 时,R2 反应器的 COD_4^+去除率略优于 R1 反应器,推测弹性填料单位表面的生物膜内功能微生物可以保持较强的持留能力和较高的生物活性[17],丝状生物膜之间形成的交织网状结构可以增强其吸附能力,强化其对污染物的“网捕”作用,因此在反应器运行期间还观察到 R2 反应器的出水较 R1 反应器的出水清澈,见图 4。与 NH_4^+–N 去除率相比,COD_{Mn} 去除率在整个运行期间最高只能达到 85%左右,推测原因,微污染原水中有机物质量浓度较低,属于寡营养环境,因此像硝化细菌等贫营养微生物便在营养竞争中处于优势地位,从而成为优势菌群,而富营养的异养菌的生存容易便受到一定程度的抑制[12]。但在挂膜成熟之后的整个运行过程中,两反应器出水的 COD_{Mn} 质量浓度分别为 1.11~3.76 mg/L、0.95~3.62 mg/L,均能达到 GBGB3838–2002Ⅱ 类标准。

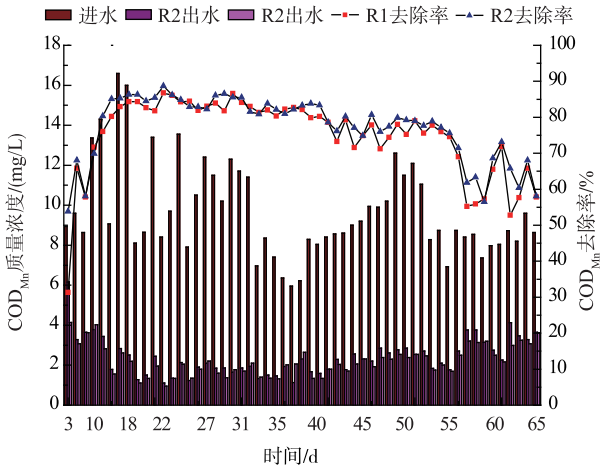


图 3 脱氮反应器 COD_{Mn} 去除性能

Fig. 3 Removel performance of COD_{Mn} in two nitrogen removel bioreactors

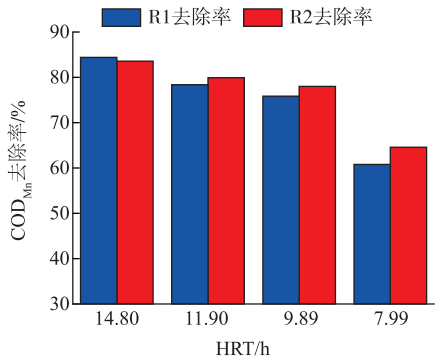


图 4 不同 HRT 时两反应器的 COD_{Mn} 平均去除率

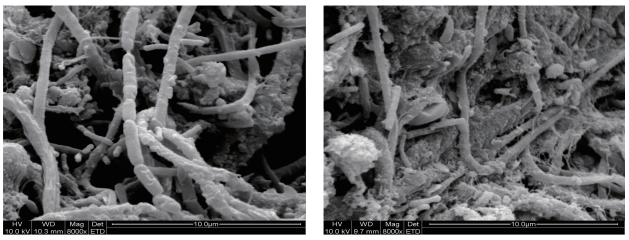
Fig. 4 Average removal of COD_{Mn} at four different hydraulic retention time(HRT)

2.3 生物相分析

生物反应器中的微生物是一个以细菌为主的群体。不同微生物具有不同的形状和指示作用,因此观察微生物及其分泌物结构对于污废水处理具有重要的重要的借鉴和指导意义[18]。

在反应器开始进水第五天后,R2 反应器中弹性填料丝表面即观察到有少量生物膜附着;而 R1 反应器中悬浮填料内部孔隙间肉眼可见少量点状菌落,进水第 14 天后在填料内部空隙间形成一层均匀的薄膜,此时 R1、R2 反应器中弹性填料丝表面附着的生物膜较前期逐渐增厚。在反应器运行前期,镜检发现两反应器生物膜内均出现少量的球菌、丝状菌等微生物,反应器运行至 65 d 时,镜检发现成

熟生物膜的形态和微生物种类具有一定的多样性，见图 5。填料表面均附着大量生物膜，生物膜内出现大量的球状、椭球状、杆状、丝状及团簇结构，尤其是 R2 反应器中生物膜的胞外分泌物较为发达，生物膜结构更为致密，更利于生物膜形成絮状结构。



(a)R1 运行65 d　　(b)R2 运行65 d

图 5　两反应器生物膜镜检

Fig. 5　Structure characteristics of biofilm in two bioreactors

表 2 列出了两反应器中不同水力停留时间下单位填料表面生物膜量(gVS/m^{-2})、反应器内总的生物膜量(gVS)以及 VS/TS 比值。可以看出，不同水力停留时间下，R2 反应器中弹性填料单位表面积附着的生物膜量以及反应器内总的生物膜量均大于 R1 反应器中悬浮填料附着的生物膜量。在进水较快即 HRT=7.99 h 的工况下，R1 反应器内悬浮填料附着生物膜的 VS/TS 比值仅为 32.01%，而 R2 反应器内弹性填料附着生物膜的 VS/TS 比值达到 40.98%，高于 R1 反应器的 8.97%，这意味着 R2 反应器内生物膜具有更高的活性生物量(VS)，这可能是 R2 反应器的运行性能优于 R1 反应器的主要原因。

另外，由于填料在有效区域内能立体全方位均匀舒展分布，使得反应器内悬浮微生物、颗粒杂质以及细胞胞外聚合物的粘合作用下迅速形成了网状生物膜，所以相比于悬浮填料，弹性填料形成生物膜较快，微生物培养驯化时间较短。弹性填料表面较多的亲水性基团以及良好的生物亲和性可以迅速吸附并聚集硝化细菌，使其在贫营养环境中可以快速的挂膜成功，从而达到快速去除污染物的效果。

表 2　填料表面生物膜量、VS/TS 比较

Table 2　Comparison of biomass and VS/TS of biofilms in two lab-scale river bioreactors

时间/d	填料类型	单位填料表面生物膜量/(gVS /m^2)	反应器内总的生物膜量(gVS)	VS/TS
35	悬浮填料	2.27	0.28	24.65%
	弹性填料	4.52	0.35	26.83%
45	悬浮填料	4.40	0.55	27.90%
	弹性填料	8.34	0.65	32.28%
55	悬浮填料	6.87	0.86	30.46%
	弹性填料	12.68	0.98	36.68%
65	悬浮填料	10.59	1.32	32.01%
	弹性填料	18.90	1.46	40.98%

3 结　语

1）采用改进型闷曝排泥挂膜可实现微污染原水修复系统快速启动，与悬浮填料相比，弹性填料率先挂膜成熟，挂膜成熟后两组反应器对 NH_4^+-N 和 COD_{Mn} 去除率均分别稳定在 95%和 80%以上。

2)随着 HRT 由 14.80 h 缩短至 7.99 h，两组反应器对 NH_4^+-N 和 COD_4^+平均去除率均有不同程度的下降，NH_4^+-N 平均去除率分别由 98.18%、98.76%降至 78.32%、87.63%，COD_{Mn} 平均去除率分别由 84.52%、83.69%降至 60.9%、64.71%，因此弹性填料在处理污染河水时具有较强的抗冲击负荷能力。

3)微生物镜检显示，与悬浮填料相比，弹性填料生物膜的胞间胶状物更为发达，生物膜结构更为致密，且不同水力停留时间下附着的生物膜量较多，VS/TS 比值较高。由此推断，与悬浮填料相比，具有良好生物亲和性的弹性填料更有利于生长缓慢、世代时间较长的 AOB 生长，从而将较为脆弱且易流失的硝化细菌固定，达到提高硝化细菌数量和强化污染物去除效率的效果。

参考文献：

[1] ZHANG Chengyun,SUN Li,JIN Lijian,et al. Discussion of ammoniacal nitrogen pollution in drinking water[J]. **Journal of Chinese Medicine Research**,2007,7(6).(in Chinese)

[2] ZOU Hua,RUAN Wenquan,CHEN Jian. The role of Nitrate in the removal of nitrogen and phosphate[J]. 2002,21(1):10-14.(in Chinese)

[3] WU Yali,XU Hai,YANG Guijun,et al. Progress in nitrogen pollution research in Lake Taihu[J]. **Journal of Lake Science**,2014(1):19-28.(in Chinese)

[4] LEENEA E J T M,DOS SANTOI V A P D,GROLLE K C F,et al. Characteristics and selection criteria for support materials for cell immobilization in wastewater treatment[J]. **Water Res**,1996,30(12):2985-2996.
[5] FANG Fang,LONG Tengrui,GUO Jinsong,et al. Effects of surface physical characteristics of protruded packing on biofilm attachment[J]. **Industrial Water&Wastewater**,2004,35(6):1-4.(in Chinese)
[6] KHATOON H,YUSOFF F,BANERJEE S,et al. Formation of periphyton biofilm and subsequent biofouling on different substrates in nutrient enriched brackishwater shrimp ponds[J]. **Aquaculture**,2007,273(4):470-477.
[7] DING D,FENG C,JIN Y,et al. Domestic sewage treatment in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) with an intelligent controlling system[J]. **Desalination**,2011,276(1):260-265.(in Chinese)
[8] WANG Yayi,LI Tanwei,PENG Yongzhen,et al. Comparisons between SBBR method and SBR method[J]. **Industrial Water & Wastewater**,2002,33(6):4-6. (in Chinese)
[9] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
[10] LI Yafeng,ZHANG Juan,ZHANG Peize,et al. Aanlysis of the natural start-up of the biological aerated filter[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University:Natural Science**,2008,24(6):1035-1038.(in Chinese)
[11] CHEN Hongbin,MEI Xiang,GAO Tingyao,et al. Process analysis of bio-film hanging to carrier during the biochemical pretreatment of polluted raw water[J]. **Technology of Water Treatement**,2001,27(4):196-199.(in Chinese)
[12] XU Bin,XIA Siqing,GAO Tingyao,et al. Study on nitrification of the micro-polluted raw water in a suspended packing bioreactor[J]. **Acta Scientiae Circumsantiae**,2003,23(6):742-747.(in Chinese)
[13] YI Ming. Standard of surface water environment quality[J]. **China Environmental Protection Industry**,2002(6):8-9. (in Chinese)
[14] LI N,HU X,LI G,et al. Influences of hydraulic retention time (HRT) and pH on shortcut nitrification and denitrification in the moving bed biofilm reactor(MBBR)[J]. **Industrial Water Treatment**,2016,36(10):20-23.
[15] HUANG Ketan,ZHU Liang,LI Guoping,et al. Study on in site bioremediation of polluted source water with simulated river bioreactor[J]. **Journal of Beijing Normal University:Natural Science**,2009,45(3):295-300.(in Chinese)
[16] KIM Y H,CHO J H,LEE Y W,et al. Development of a carrier for adhesion of nitrifying bacteria using a thermodynamic approach[J]. **Biotechnology Techniques**,1997,11(11):773-776.
[17] WANG B,ZHAO Y S,QU Z H,et al.[Impact of depth and moisture to diesel degradation in sand layer of vadose zone][J]. **Environmental Science**,2011,32(2):530.
[18] ZHANG Jinfeng,LI Ming,XU Miao,et al. Treatment and biological phases of interferon production wastewater[J]. **City Environment and City Ecology**,2012,25(4):40-46.(in Chinese)

科 技 信 息

欧盟评估硒酸钠作为饲料添加剂的安全性和有效性

2019 年 7 月 22 日,据欧盟食品安全局(EFSA)消息,应欧盟委员会要求,欧盟动物饲料添加剂和产品(FEEDAP)研究小组对硒酸钠(sodium selenate)作为反刍动物营养饲料添加剂的安全性和有效性进行了评估。

经过评估,FEEDAP 小组认为该添加剂是一种皮肤过敏剂和呼吸过敏剂,在其作为反刍动物饲料添加剂的预期用途中,是其他授权硒添加剂的替代品,不会进一步增加硒的环境负担,通过注射给反刍动物的硒酸钠能够满足动物需求的有效硒源。

[信息来源] 食品伙伴网. 欧盟评估硒酸钠作为饲料添加剂的安全性和有效性 [EB/OL]. (2019-7-24). http://news.foodmate.net/2019/07/527532.html