

生物接触氧化法净化供水原水现场试验

吕学研^{1,2,3}, 季铁梅⁴, 阮晓红⁵

(1. 南京大学 环境学院 污染控制与资源化利用国家重点实验室, 江苏 南京 210020; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036; 4. 上海水文站 上海水环境监测中心, 上海 200232; 5. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 为了考察生物接触氧化法对供水原水的净化效果, 以不同填料为基质构建了4组生物接触氧化池, 开展野外现场试验。结果表明: 组合填料、弹性填料、SDF阿科曼和BDF阿科曼4组生物接触氧化池对TP的平均去除率分别为59.4%、59.4%、44.7%和51.9%; 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率分别为36.5%、33.4%、35.0%和36.6%; 对TN的平均去除率分别为21.6%、18.8%、22.3%和18.0%; 对 COD_{Mn} 的平均去除率分别为13.9%、13.7%、14.5%和13.4%; 对TOC的平均去除率分别为10.7%、13.6%、13.4%和11.5%; 对 UVA_{254} 的平均去除率分别为31.1%、34.0%、25.3%和26.2%; 对 UVA_{410} 的平均去除率分别为54.2%、62.0%、47.2%和49.3%。综合而言, 组合填料生物接触氧化池对原水氮、磷营养盐的净化效果最好, 弹性填料生物接触氧化池对原水有机物的净化效果最好, 其次是组合填料生物接触氧化池。

关键词: 生物接触氧化法; 供水; 原水净化; 现场试验

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0006-05

Field experiment on treatment of source water supply by biological contact oxidation process

LÜ Xueyan^{1,2,3}, JI Tiemei⁴, RUAN Xiaohong⁵

(1. State Key Laboratory of Pollutant Control and Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210020, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210029, China; 3. Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China; 4. Shanghai Hydrology Station, Shanghai Water Environment Monitoring Center, Shanghai 200232, China; 5. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In order to study the purification effect of biological contact oxidation process on source water, the paper took different fillers as matrix to construct four biological contact oxidation ponds and conducted field experiment. The result showed that the mean removal rates of TP of the four biological contact oxidation ponds such as combined medium (AM), elastic medium (EM), SDF AquaMats (SDFM) and BDF AquaMats (BDFM) are 59.4%, 59.4%, 44.7% and 51.9% respectively; the mean removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ are 36.5%, 33.4%, 35.0% and 36.6% respectively; the mean removal rates of TN are 21.6%, 18.8%, 22.3% and 18.0% respectively. For organic matters, the mean removal rates of COD_{Mn} are 13.9%, 13.7%, 14.5% and 13.4% respectively; the mean removal rates of TOC are 10.7%, 13.6%, 13.4% and 11.5% respectively; the mean removal rates of UVA_{254} are 31.1%, 34.0%, 25.3% and 26.2% respectively; the mean removal rates of UVA_{410} are 54.2%, 62.0%, 47.2% and 49.3% respectively. Totally, the biological contact oxidation pond of combined medium has the best purification effect on nitrogen and phosphorus. The biological contact oxidation pond of elastic medium has the best purification effect on organic matter in raw water and followed by the biological contact oxidation pond of combined medium.

收稿日期: 2015-11-20; 修回日期: 2015-12-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07506-003); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2014491411)

作者简介: 吕学研(1984-), 男, 江苏宿迁人, 博士, 工程师, 主要从事水污染控制及环境与生态水力学研究。

Key words: biological contact oxidation process; water supply; source water purification; field experiment

氯气是目前许多国家饮用水处理过程中最常用的消毒剂,在今后的很长时间内也将是使用最多的消毒剂。为了抑制配水管网内微生物的生长,目前各个国家都规定饮用水中必须含有一定量的余氯。在饮用水的分配和储存过程中,水中的余氯,特别是自由态余氯,会与饮用水中的天然有机物(NOM)反应生成消毒副产物(DBPs),导致配水和储存系统内的DBPs浓度高于自来水厂出水中DBPs的浓度^[1]。三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)是两类已经确认对人体有害的消毒副产物,美国规定饮用水中THMs和HAAs的限值分别为80和60 μg/L。但是Murray和Parsons的研究发现^[2],1.0 mg/L的总有机碳(TOC)可产生90 μg/L的THMs。常规工艺的混凝/絮凝过程对NOM,尤其是小分子量NOM的去除能力有限,很难使出水的TOC浓度小于1.0 mg/L。韩帮军等^[3]的研究表明,若要将THMs和HAAs的生成量控制在允许的限值内,则必须确保氯化消毒过程进水的UVA₂₅₄值(波长254 nm处的吸光度)小于0.017 cm⁻¹(高温水质)或0.045 ~ 0.050 cm⁻¹(低温水质);而岳舜琳^[4]研究发现,水中COD_{Mn}、TOC和UVA₂₅₄含量与Ames致突变率呈较好的相关关系,为使自来水的Ames致突变试验结果为阴性,原水的COD_{Mn}要不大于4.0 mg/L,自来水的COD_{Mn}、TOC和UVA₂₅₄要分别降到2.0、5.0和0.080 cm⁻¹以下。氮、磷是微生物的重要营养元素。有效降低饮用水中的磷,可以保证即使在管网内生物可利用有机碳(AOC)含量较高的情况也能限制细菌的生长^[5],从而确保饮用水的生物安全性。在氮素方面,刘建琪等^[6]调查发现,饮用水中的细菌和大肠菌总数与“三氮”都存在相关性。《生活饮用水卫生标准 GB5749-2006》将NH₄⁺-N作为饮用水感官性状和一般化学指标非常规指标中的一项,规定饮用水的NH₄⁺-N限值为0.5 mg/L,但是研究表明^[7],配水管网内NH₄⁺-N只要达到0.25 mg/L就可以促进硝化细菌的生长繁殖,从而使饮用水产生臭味;此外,含氮有机物会与氯气反应,导致氯气投加量增加的同时也导致DBPs生成潜能的上升^[8]。所以,有必要采取措施降低饮用水中氮、磷的含量,以保证饮用水供水的生物和化学安全性。

当前关于生物接触氧化法净化水质的报道中,多采用组合填料和弹性填料作为生物载体。阿科蔓

生态基是美国梅瑞地安公司研发,在水生态环境修复和水污染治理中已经得到应用。为了对比传统组合填料、弹性填料与新型生物载体在水质净化上的效果。本文以组合填料、弹性填料、悬浮式阿科蔓生态基(SDF阿科蔓)和沉底式阿科蔓生态基(BDF阿科蔓)4种不同生物接触氧化填料为介质,构建生物接触氧化法净化供水原水现场试验装置,开展现场试验,考察生物接触氧化工艺对原水氮、磷营养指标、有机污染指标的净化效果。

1 材料与方法

1.1 生物接触氧化池

现场建成4座生物接触氧化池,每座生物接触氧化池由3个小格组成。每个小格的尺寸为1.5 m × 1.5 m × 1.5 m(长×宽×高),池内水深保持1.3 m。组合填料、弹性填料、悬浮式阿科蔓生态基(SDF阿科蔓)和沉底式阿科蔓生态基(BDF阿科蔓)作为介质被分别放入4座生物接触氧化池中。填料的最佳填充密度以及现场试验的水力停留时间根据室内试验的结果和厂家的推荐值确定。现场试验系统在自然条件下连续运行。原水在进入生物接触氧化池之前,首先被泵入沉淀池中进行沉沙处理,随后再分配到各生物接触氧化池中进行现场试验。生物接触氧化池具体结构参见文献^[9]。

1.2 指标与分析方法

氮、磷营养盐指标NH₄⁺-N、TP和TN分别采用纳氏试剂分光光度法、过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法和碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;有机污染物综合指标COD_{Mn}采用酸性滴定法测定。

UVA₂₅₄、TOC和比吸光度(SUVA = UVA₂₅₄/TOC)是NOM常用的定量、定性指标。NOM的吸光特性主要是具有芳香性的有色基团造成的。因此,SUVA可以反映水中NOM的芳香化程度^[10]。410 nm处的吸光度(UVA₄₁₀)代表着影响水体颜色的NOM。这一类NOM的分子量要大于UVA₂₅₄所代表的NOM^[11]。因此,本文以UVA₂₅₄、TOC、SUVA和UVA₄₁₀作为水体NOM的表征指标进行结果分析。

TOC采用TOC-TN分析仪(HACH IL550, USA)测定。UVA₂₅₄和UVA₄₁₀在紫外-可见分光光度计(Angelient8453, USA)上用1 cm光程的石英比

色皿测定。

2 结果与讨论

2.1 对氮、磷营养盐的净化效果

试验期间,原水的 TP、NH₄⁺—N 和 TN 浓度分别为 0.010 ~ 0.068、0.266 ~ 0.864 和 0.70 ~ 3.91 mg/L。组合填料、弹性填料、SDF 阿科蔓和 BDF 阿科蔓 4 组生物接触氧化池对 TP 的平均有效去除率分别为 59.4%、59.4%、44.7% 和 51.9% (图 1),对 NH₄⁺—N 的平均有效去除率分别为 36.5%、33.4%、35.0% 和 36.6% (图 2),对 TN 的平均有效

去除率分别为 21.6%、18.8%、22.3% 和 18.0% (图 3)。由此可见,组合填料和弹性填料生物接触氧化池对 TP 的净化能力最强,SDF 阿科蔓生物接触氧化池的净化能力最弱;组合填料、弹性填料和 BDF 阿科蔓生物接触氧化池对 NH₄⁺—N 的净化能力相当,均稍高于 SDF 阿科蔓生物氧化接触池;组合填料和 SDF 阿科蔓生物接触氧化池对 TN 的净化能力相当,弹性填料和 BDF 阿科蔓生物接触氧化池对 TN 的净化能力相当,且稍低于前两者。综合而言,组合填料生物接触氧化池对原水氮、磷营养盐的净化效果最好。

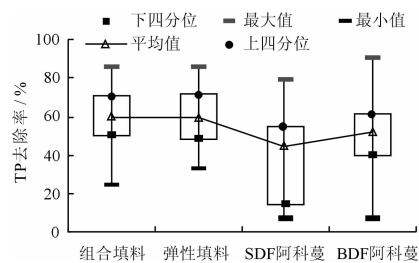


图1 TP 的去除率

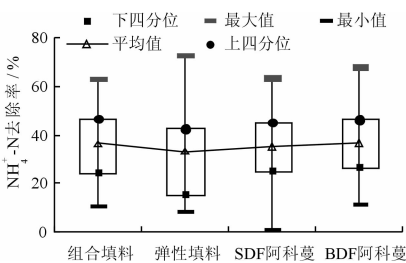


图2 NH₄⁺—N 的去除率

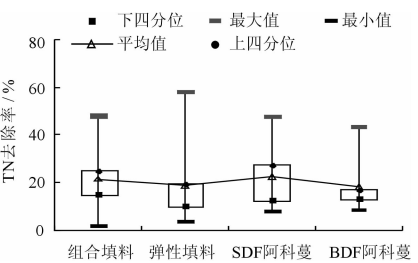


图3 TN 的去除率

2.2 对有机物的净化效果

试验期间,原水 COD_{Mn}、TOC、UVA₂₅₄ 和 UVA₄₁₀ 的变化范围分别为 3.67 ~ 5.44、3.50 ~ 5.12 mg/L (受监测方法限制,本文的 TOC 实际上代表的是原水中的不可吹脱性有机物,即 NPOC,造成表观数值上的范围低于 COD_{Mn} 的变化范围)、0.106 ~ 0.211 cm⁻¹ 和 0.019 ~ 0.068 cm⁻¹。组合填料、弹性填料、SDF 阿科蔓和 BDF 阿科蔓 4 组生物接触氧化池对 COD_{Mn} 的平均有效去除率分别为 13.9%、13.7%、14.5% 和 13.4%,对 TOC 的平均有效去除率分别为 10.7%、13.6%、13.4% 和 11.5%,对 UVA₂₅₄ 的平均有效去除率分别为 31.1%、34.0%、25.3% 和 26.2%,对 UVA₄₁₀ 的平均有效去除率分别为 54.2%、62.0%、47.2% 和 49.3%。

4 组生物接触氧化池对 COD_{Mn} 的净化能力相当;弹性填料和 SDF 阿科蔓生物接触氧化池对 TOC 的净化能力相当,稍高于组合填料和 BDF 阿科蔓生物接触氧化池;弹性填料生物接触氧化池对 UVA₂₅₄ 和 UVA₄₁₀ 的净化能力最高,其次是组合填料,SDF 阿科蔓生物接触氧化池对 UVA₂₅₄ 和 UVA₄₁₀ 的净化能力最差,稍低于 BDF 阿科蔓生物接触氧化池。综合而言,弹性填料生物接触氧化池对有机物指标的净化效果最好,其次是组合填料生物接触氧化池。

2.3 系统运行稳定性分析

以变异系数(标准差/平均值)考察系统运行的稳定性,变异系数越大,系统的稳定性越差,反之,系统的稳定性越好。计算结果(表 1)表明,试验期间,4 组生物接触氧化池净化 TP 和 UVA₄₁₀ 的稳定性最好,净化 TN、COD_{Mn} 和 TOC 的稳定性最差,尤其是 COD_{Mn} 和 TOC,变异系数均在 0.70 以上。结合平均有效去除率数据可以发现,系统运行的稳定性与指标的有效去除率存在一定的相关性,去除率高,指标净化的稳定性也相对较高。

表 1 试验期间 4 组生物接触氧化池净化效果变异系数

氧化池类别	TP	NH ₄ ⁺ —N	TN	COD _{Mn}	TOC	UVA ₂₅₄	UVA ₄₁₀
组合填料	0.28	0.42	0.54	0.82	0.73	0.40	0.29
弹性填料	0.25	0.58	0.83	0.79	0.73	0.30	0.18
SDF 阿科蔓	0.45	0.42	0.58	0.83	0.91	0.47	0.31
BDF 阿科蔓	0.32	0.37	0.52	0.76	0.73	0.40	0.36

2.4 与室内试验结果对比

表 2 为室内试验条件下以组合填料、弹性填料和 SDF 阿科蔓生态基为填料的生物接触氧化法对相关指标的净化情况^[12]。对比结果表明,除 TP 去除率低于现场试验外,NH₄⁺—N、COD_{Mn} 和 UVA₂₅₄ 的去除率均显著高于现场试验。李驰昊等^[13]的室内试验结果也表明,以阿科蔓生态基为介质的生物接

触氧化法对 TP、NH₄⁺—N、COD_{Mn} 和 TN 的平均去除率分别为 40.1%、87.2%、54.1% 和 67.4%。这一差异可能主要与试验条件差异有关。室内试验条件下,原水多为人工配置的模拟水,其成分复杂程度远

低于现场试验系统,尤其是有机物,容易造成有机物的去除率偏高^[13]。同时,温度、光照等外界条件的不可控因素也对系统的净化能力存在显著的影响^[14]。

表 2 室内试验相关指标去除率变化

填料类型	TP		NH ₄ ⁺ —N		COD _{Mn}		UVA ₂₅₄	
	进水浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/%	进水浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/%	进水浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/%	进水浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/%
组合填料	0.114~0.283	35.88~41.85	0.516~1.420	58.51~67.74	5.71~9.75	59.34~82.45	0.120~0.146	56.64~68.50
弹性填料	0.169~0.261	42.79~65.27	0.471~1.453	71.72~84.47	5.35~9.16	64.50~88.41	0.118~0.150	59.69~80.00
SDF 阿科蔓	0.158~0.259	38.24~60.81	0.715~1.408	71.26~80.07	5.42~9.31	58.12~84.78	0.103~0.147	60.19~74.80

2.5 与其他研究结果对比

自生物接触氧化法被用于水质净化以来,已经广泛应用于多种污废水的处理。随着水源地水质的恶化,生物接触氧化法也被应用到微污染原水的净化中。生物接触氧化法的水质净化效果与进水浓度、污染物组成、气温、介质类型以及运行条件等息息相关。表 3 列举了国内部分关于生物接触氧化法对微污染原水的净化效果,结合孙红梅^[12]的总结成果,发现本次试验的 4 组生物接触氧化池对 NH₄⁺—N 的有效去除率在正常范围内变化,但是总体偏低;对 COD_{Mn} 的有效去除率总体与现有研究成果一致;对 UVA₂₅₄ 的有效去除率高于已有报道。

2.6 有机物指标净化效果差异分析

对于有机污染物指标,结果(图 4~7)显示,不

同指标去除率之间的差异较为显著,均以 UVA₄₁₀ 的去除率最高,而以 TOC 的去除率最低。这是因为,这些指标代表着 NOM 的不同组成,这些成分在生物接触氧化池内经历了不同的降解过程。COD_{Mn} 是指水质样品对氧化剂高锰酸钾的消耗量(以需氧量表示)。在样品测定过程中,无机还原性物质(亚硝酸盐、亚铁离子、硫化物等)和能被高锰酸钾氧化的有机物质均会消耗高锰酸钾。所以,COD_{Mn} 是无机还原性物质和有机物质的综合表征指标。在测定的条件下,样品中仅有一半的有机物能够被高锰酸钾完全氧化。UVA₂₅₄ 和 UVA₄₁₀ 是两个光学指标,分别代表了腐殖酸类物质和相对分子量较大的有机物质。TOC 是样品中所有含碳有机物的综合指标,不区分有机物质的分子量大小。

表 3 国内生物接触氧化法对微污染原水净化效果

研究来源	填料类型	HRT/h	NH ₄ ⁺ —N/%	TN/%	COD _{Mn} /%	UVA ₂₅₄ /%
王华成 ^[15]	弹性填料	1.6	35.9		19.8	5.9
唐廷,等 ^[16]	悬浮填料	1.0	>70.0		15.0 左右	
徐兵,等 ^[17]	立体弹性填料	1.0	50~80		6.5 左右	
	LT100 悬浮球填料	1.5	70~90		12 左右	
	圆柱斜切填料	1.0	平均 86.2			
黄廷林,等 ^[18]	新型悬浮填料		73 左右	77 左右	9.4~28.0	
杨卫权,等 ^[19]	YDJ 弹性波纹立体填料		54.0~76.1			
张东,等 ^[20]	YDT 弹性立体填料	1.1	60~80		0.5~25	1~15

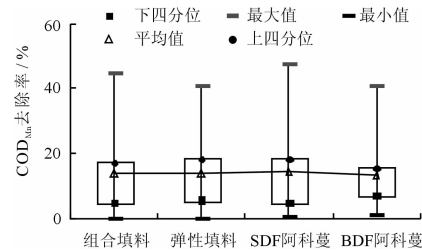


图 4 COD_{Mn} 的去除率

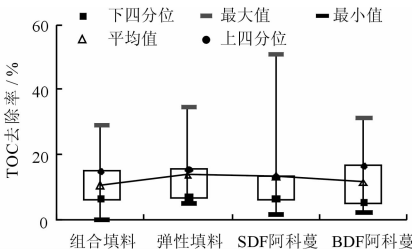


图 5 TOC 的去除率

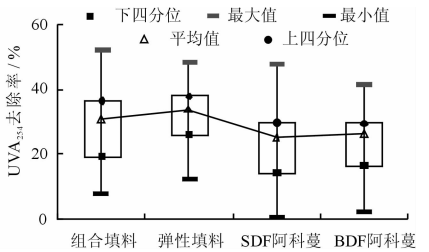


图 6 UVA₂₅₄ 的去除率

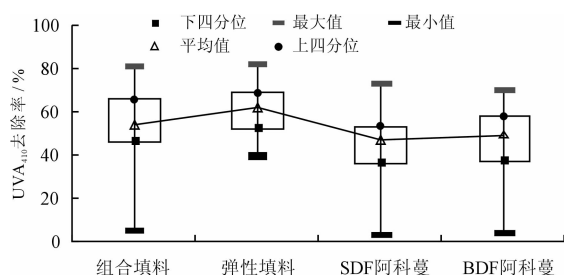


图7 UVA₄₁₀ 的去除率

在生物接触氧化池内,大分子量的有机物质逐渐被降解成分子量较小的有机物,并最终被微生物利用或被矿化成无机物质。UVA₂₅₄ 和 UVA₄₁₀ 的比率用来表征 NOM 的分子量变化。比率升高,说明更多的大分子 NOM 被降解成小分子 NOM。试验期间,进水的 UVA₂₅₄/UVA₄₁₀ 均值为 3.29 cm⁻¹,4 组生物接触氧化池出水的 UVA₂₅₄/UVA₄₁₀ 均值分别为 5.34、6.10、4.70 和 4.86 cm⁻¹,表明大分子量有机物得到了一定降解。与 UVA₂₅₄ 和 UVA₄₁₀ 较高的去除率相比,较低的 TOC 去除率表明人工湿地内的 NOM 并未能实现完全矿化,而是仅仅发生了物质结构的简单裂解。Liu Guojing 等^[21] 在研究 TiO₂ 光催化氧化腐殖酸时也出现过相同的情况。

254 nm 处的 SUVA 广泛用于 NOM 组成的划分。如果 SUVA > 4 L/(mg · m),说明 NOM 主要由腐殖酸类物质组成,而 SUVA < 3 L/(mg · m) 则表明 NOM 主要是由非腐殖酸类物质组成。试验期间,原水的 SUVA₂₅₄ 均值为 3.56 L/(mg · m),表明原水的 NOM 由腐殖酸和非腐殖酸类物质共同构成。4 组生物接触氧化池出水的 SUVA₂₅₄ 分别为组合填料 2.67 L/(mg · m)、弹性填料 2.57 L/(mg · m)、SDF 阿科蔓 3.00 L/(mg · m) 和 BDF 阿科蔓 2.82 L/(mg · m),说明原水中的腐殖酸类物质得到了降解,出水中 NOM 以非腐殖酸类物质为主。

3 结 论

以组合填料、弹性填料、SDF 阿科蔓和 BDF 阿科蔓不同填料为基质,构建了 4 组生物接触氧化池开展野外现场试验。结果表明:

(1) 在氮、磷营养盐方面,4 组生物接触氧化池对 TP 的平均去除率为 44.7% ~ 59.4%,对 NH₄⁺—N 的平均去除率为 33.4% ~ 36.6%,对 TN 的平均去除率为 18.0% ~ 22.3%;组合填料生物接触氧化池对氮、磷营养盐的净化效果最好。

(2) 对于有机物,对 COD_{Mn} 的平均去除率为

13.4% ~ 14.5%,对 TOC 的平均去除率为 10.7% ~ 13.6%,对 UVA₂₅₄ 的平均去除率为 25.3% ~ 34.0%,对 UVA₄₁₀ 的平均去除率为 47.2% ~ 62.0%;弹性填料生物接触氧化池对原水中有机物的净化效果最好,其次是组合填料生物接触氧化池。

参考文献:

- [1] Hsin - hsin Tung, Yuefeng F Xie. Association between haloacetic acid degradation and heterotrophic bacteria in water distribution systems[J]. Water Research, 2009, 43 (1): 971 - 978.
- [2] Murray CA, Parsons SA. Removal of NOM from drinking water: Fenton's and photo - Fenton's processes[J]. Chemosphere, 2004, 54 (7): 1017 - 1023.
- [3] 韩帮军, 马 军, 陈忠林, 等. 臭氧催化氧化与 BAC 联用控制氯化消毒副产物[J]. 中国给水排水, 2006, 22 (17): 18 - 21 + 25.
- [4] 岳舜琳. 给水中有机物与 Ames 致突变物的相关性[J]. 中国给水排水, 2003, 19 (1): 20 - 22.
- [5] 姜登岭, 张晓健. 饮用水中磷与细菌再生长的关系[J]. 环境科学, 2004, 25 (5): 57 - 60.
- [6] 刘建琪, 李 昱. 细菌学指标与“三氮”及耗氧量的相关分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16 (9): 1084 - 1084 + 1111.
- [7] Rogalla F, Badard M, Hansen F, et al. Upscaling a compact nitrogen removal process[J]. Water Science & Technology, 1992, 26: 1067 - 1076.
- [8] 王花平. 有机氮类化合物对饮用水氯化消毒影响研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [9] 李富果. 生物氧化法去除水源水中有机污染物研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [10] Rubia Á, Rodríguez M, León V M, et al. Removal of natural organic matter and THM formation potential by ultra - and nanofiltration of surface water[J]. Water Research, 2008, 42 (3): 714 - 722.
- [11] Andersen D O, Gjessing E T. Natural organic matter (NOM) in a limed lake and its tributaries[J]. Water Research, 2002, 36 (9): 2372 - 2382.
- [12] 孙红梅. 几种载体对微污染水的生物净化效果比较研究[D]. 南京: 东南大学, 2008.
- [13] 李驰昊, 施永生, 赵 璇, 等. 阿科蔓介质生物接触氧化法预处理微污染原水[J]. 环境工程学报, 2015, 9 (5): 2317 - 2323.
- [14] 任存业. 生物接触氧化预处理池的运行管理[J]. 净水技术, 1998, 65 (3): 35 - 37.
- [15] 王华成. 跌水曝气生物接触氧化 - 超滤组合工艺净水技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.

(下转第 17 页)

- [15] 黄聿刚,丛振涛,雷志栋,等. 新疆麦盖提绿洲水资源利用与耗水分析——绿洲耗散型水文模型的应用[J]. 水利学报,2005,36(9):1062–1066.
- [16] Xu Jianhua, Chen Yaning, Li Weihong, et al. An integrated statistical approach to identify the nonlinear trend of runoff in the Hotan River and its relation with climatic factors [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2011,25(2):223–233.
- [17] Chen Yaning, Xu Changchun, Hao Xingming, et al. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River Basin, China [J]. Quaternary International,2009,208(1):53–61.
- [18] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. Nature,2010,463(7282):747–756.
- [19] Tie Liu, Willems P, Pan X L, et al. Climate change impact on water resource extremes in a headwater region of the Tarim basin in China [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(11):3511–3527.
- [20] 李静,焦树林,梁虹,等. 基于 MIKE SHE 分布式水文模型的降水时间尺度对喀斯特流域径流模拟的影响研究——以红水河系六洞河流域为例[J]. 中国岩溶,2012,31(4):388–394.
- [21] Thompson J R, Sorenson H R, Gavin H, et al. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England [J]. Journal of Hydrology,2004,293(1):151–179.
- [22] 郑震,张静,宫辉力. MIKE SHE 水文模型参数的不确定性研究[J]. 人民黄河,2015,37(1):23–26.
- [23] Janssen P H M, Heuberger P S C. Calibration of process-oriented models [J]. Ecological Modelling,1995,83(1):55–66.
- [24] Guo Hao, Chen Sheng, Bao Anming, et al. Inter-comparison of high-resolution satellite precipitation products over Central Asia[J]. Remote Sensing,2015,7(6):7181–7211.

(上接第10页)

- [16] 唐廷,张玉先,黄正杰,等. 福州市东南区水厂原水生物预处理试验研究[J]. 中国给水排水,2010,26(5):84–87+92.
- [17] 徐兵,贺尧基. 嘉兴地区水厂生物预处理与深度处理的生产实践[J]. 中国给水排水,2007,23(8):56–58.
- [18] 黄廷林,魏巍,苏俊峰,等. 贫营养原位生物接触氧化法对微污染水源水的脱氮试验研究[J]. 水处理技术,2010,36(6):95–99.
- [19] 杨卫权,丁卫东. 上海惠南水厂生物接触预处理池的运行[J]. 中国给水排水,2003,19(9):100–102.
- [20] 张东,许建华,刘辉. 微污染原水的生物接触氧化预处理研究[J]. 中国给水排水,2000,16(12):6–9.
- [21] Liu Guojing, Zhang Xiangru, Talley J W, et al. Effect of NOM on arsenic adsorption by TiO_2 in simulated As(III)-contaminated raw waters[J]. Water Research,2008,42(8–9):2309–2319.