DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.012

营养物质和氯对饮用水中细菌再生长的影响

李伟英[1,2],周艳彦[1,2],张骏鹏[1,2],王 峰[1,2],白 涛[3],张 伟[4]

(1.同济大学 环境科学与工程学院,上海 200092;2.长江水环境教育部重点实验室(同济大学),上海 200092;
3.上海同济城市规划设计研究院,上海 200092;4.成都川力智能流体设备股份有限公司,成都 611500)

摘 要:饮用水生物稳定性与水质安全息息相关,控制细菌再生长是保障饮用水生物稳定性的有效措施.为此,以细菌再生长潜力(BRP)为研究方法,采用实验室配水实验,探讨碳、氮、磷 3 种营养物质以及自由氯对细菌再生长潜力的影响.结果表明,单一营养物质不足时,满足土著细菌生长的碳、氮、磷营养物质质量浓度的临界值分别为 250、7 和 3 μg/L,碳、氮、磷对 BRP 的产率系数分别为 2.35×10^6($R^2=0.99$, $p<0.05$)、9.76×10^7($R^2=0.91$, $p<0.05$)和 1.76×10^8 CFU/μg($R^2=0.91$, $p<0.05$);两种营养物质不足时,相对质量浓度较低的营养物质为 BRP 主要限制因子,而且可导致其他营养物质支持细菌再生长能力的下降.研究发现随着水中自由氯质量浓度的增加,BRP 呈下降趋势,当自由氯质量浓度≥0.50 mg/L,细菌生长得到有效控制,氯削减水中营养物质促进细菌再生长的能力.

关键词:饮用水;生物稳定性;细菌再生长潜力;营养物质;氯;限制因子

中图分类号:X703 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2017)02-0070-07

Effects of nutrients and chlorine on bacterial regrowth in drinking water

LI Weiying[1,2], ZHOU Yanyan[1,2], ZHANG Junpeng[1,2], WANG Feng[1,2], BAI Tao[3], ZHANG Wei[4]

(1.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.Key Laboratory of Yangtze Aquatic Environment (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 3.Shanghai Tongji Urban Planning & Design Institute, Shanghai 200092, China;4.Chengdu Chuanli Intelligence Fuild Equipment Co., Ltd., Chengdu 611500, China)

Abstract: The biological stability is closely associated with the safety of drinking water and can be controlled effectively by prohibiting bacterial regrowth. The effects of three main nutrients (organic carbon, phosphorus, nitrogen) and chlorine on bacterial regrowth in drinking water were investigated using BRP method in lab-scale experiments. The critical values of carbon, nitrogen and phosphorus promoting bacterial growth were 250, 7 and 3 μg/L respectively, while the yield values for heterotrophic bacteria of the three nutrients were 2.35×10^6($R^2=0.99$, $p<0.05$), 9.76×10^7($R^2=0.91$, $p<0.05$) and 1.76×10^8 CFU/μg ($R^2=0.91$, $p<0.05$) during the absence of only one kind of nutrient. When two kinds of nutrients were in deficiency, nutrient which was relatively low would be the main BRP limiting factor and decrease the supporting ability of the other nutrients on bacterial regrowth. Moreover, BRP decrease with the increasing amount of free chlorine in drinking water. When the concentration of free chlorine reached 0.5 mg/L, the growth of bacteria was inhibited obviously. In other words, free chlorine weakened the ability of nutrients supporting bacterial regrowth.

Keywords: drinking water; biological stability; bacterial regrowth potential (BRP); nutrient; chlorine; limiting factor

饮用水安全问题关系到人类的生存与健康[1-2].尽管给水处理厂出水水质能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求,但随着供水管网输送距离的增加,水中细菌总数、浑浊度等随之增加,从而导致管网水质的“二次污染”[3-4].管网中细菌的生长繁殖是造成管网水质降低的重要原因之一,其与营养物质质量浓度、消毒剂余量等因素相关[5].营养物质为细菌提供能源并合成细胞物质,其组成和比例决定了细菌的生长程度和种类[6].消毒剂可有效灭活并抑制细菌再生长,是保证供水管网水质安全的重要环节.有机碳为细菌生长的主要限制元素,生物可同化有机碳(assimilable organic carbon, AOC)和生物可降解溶解性有机碳(biodegradable dissolved organic carbon, BDOC)常作为饮用水生物稳定性评价指标[7-8].不加氯时, AOC<10 μg/L 乙酸碳;加氯时,AOC 在 50~100 μg/L时饮用水处于生物稳定[9-10].Dukan 等[11]运用动态模型认为水中 BDOC 低于 0.20~0.25 mg/L时,水质生物稳定性较高.近几年,国内外学者发现部分地区的饮用水中磷

收稿日期:2016-01-27
基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项"江苏太湖水源饮用水安全保障技术集成与综合示范"(2012ZX07403-001);成都川力直饮水工程安全保障技术的研究(20150911);苏州地区饮用水管网生物稳定性及控制技术研究(20150719)
作者简介:李伟英(1968—),女,教授,博士生导师
通信作者:李伟英,liweiying@ tongji.edu.cn

质量浓度较低，磷元素成为管网水中细菌再生长的主要限制因子[12-13]. 当生物可利用磷（microbially available phosphorus，MAP）质量浓度在 1～3 μg/L 时，磷会限制细菌的生长[14]. 往往同一水样中多种营养物质同时具有限制因子的作用[15]. 因此，在探讨单一营养物质基础上，有必要研究多种营养物质对细菌再生长的作用. Sathasivan 等[16]提出了以细菌再生长潜力（bacterial regrowth potential，BRP）作为评价生物稳定性的指标，此方法以水样本身的土著混合细菌为接种菌种，对接种后水样进行培养，以最终的细菌数量（CFU/mL）表示水样中各类营养物质和环境条件支持细菌再生长的潜力. 叶林等[17]认为 BRP 与 BDOC 具有较好的相关性，可作为中国一般给水厂生物稳定性评价的参考指标. 本文以 BRP 为研究方法，结合配水实验，探讨碳、氮、磷 3 种营养物质以及自由氯对 BRP 的影响，以期为保障供水系统水质生物稳定性提供理论参考.

1　实　验

1.1　水样

本实验为超纯水配水小试实验，为避免水样受其他营养物质不足的干扰，在水中投加过量无机营养组分，其种类、质量浓度见表 1. 各实验中碳、氮、磷元素以 NaAc、KNO_3 和 KH_2PO_4 的形式进行添加，NaAc、KNO_3 和 KH_2PO_4 充足时添加量分别为 5 667、10 110、1 320 μg/L[16].

表 1　测定 BRP 需要添加的营养物质质量浓度

Tab.1　Addition of nutrients concentration for BRP experiment　　μg · L^{-1}

Na_2SO_4	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	$ZnCl_2$	$MnSO_4 \cdot H_2O$	$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$
450.0	185.0	415.0	245.0	20.4	27.1	10.6	778.0	1.0

配置含氯水时，除投加上述营养物质外，另外添加自由氯. 实验采用次氯酸钠溶液，自由氯质量浓度用 DPD 比色法确定. 检测仪器采用 PC Ⅱ 型单参数水质分析仪.

1.2　BRP 实验方法

1.2.1　实验材料的准备

为避免外部污染引起的实验误差，玻璃器皿在使用前需经过洗涤剂浸泡 12 h；自来水、去离子水先后冲洗；稀盐酸溶液浸泡 12 h；自来水、去离子水先后冲洗；121 ℃高压蒸汽灭菌 20 min 的处理步骤后，烘干待用.

1.2.2　接种液的准备

取某水库水源水为接种用原液，8 个月内对该水源水检测的基本水质参数见表 2. 原水经 2 μm 微孔滤膜过滤去除杂质微粒后，加入具塞磨口锥形瓶中，20 ℃避光培养 5 d 得接种液.

表 2　接种用原水基本水质参数

Tab.2　Water quality indexes of raw water

浊度/NTU	TOC/（mg · L^{-1}）	TN/（mg · L^{-1}）	氨氮/（mg · L^{-1}）	硝酸盐/（以氮计，mg · L^{-1}）	亚硝酸盐/（以氮计，mg · L^{-1}）	TP/（mg · L^{-1}）
8～22	2.4～2.6	1.7～2.0	0.05～0.18	1.2～1.7	0.006～0.028	0.05～0.08

1.2.3　水样的接种与培养

每个样品取 100 mL 水样进行实验，按接种液与水样的体积比为 1∶100，即向 100 mL 水样中加入 1 mL接种液，摇匀后，20 ℃避光培养 5 d.

1.2.4　结果表征

采用异养菌平板计数法（heterotrophic plate counting，HPC）对培养后的水样进行细菌计数，采用 R2A 培养基[18]，20 ℃培养 7 d 计数结果即 BRP 的检测值，以 CFU/mL 表示.

1.3　分析方法

本文中营养物质支持细菌的再生长能力采用该营养物质的产率系数表征，产率系数分析计算采用软件 Origin 9.1 里 Analysis 选项中的 linear fitting 功能. $p<0.05$ 时认为数据相关性显著.

2　结果与讨论

2.1　营养物质对 BRP 的影响

2.1.1　单一碳、氮、磷质量浓度变化对 BRP 的影响

图 1（a）、（b）、（c）为添加充足其他营养物质后，碳、氮、磷质量浓度分别对水样 BRP 的影响. 碳质量浓度为 250 μg /L 是促进细菌生长的临界值，当碳质量浓度<250 μg/L 时，水样的 BRP 随着碳质量浓度的升高而增大，碳支持土著细菌再生长的的产率系数为 2.35×10^6 CFU/μg（$R^2=0.99$，$p<0.05$）. 氮质量浓度<7 μg/L 时，BRP 随着氮质量浓度增大的趋势较为明显，氮对土著细菌再生长的产率系数为 9.76×10^7CFU/μg（$R^2=0.91$，$p<0.05$），氮质量浓度>7 μg/L 时，BRP 随氮质量浓度增加变化不明显，

即 7 μg/L 的氮质量浓度是促进细菌生长的临界值.磷质量浓度为 3 μg/L 是促进细菌生长的临界值,磷质量浓度<3 μg/L 时,BRP 随着磷质量浓度增大的趋势较为明显,磷对土著细菌再生长的产率系数为 1.76×10^8 CFU/μg($R^2=0.91$, $p<0.05$).

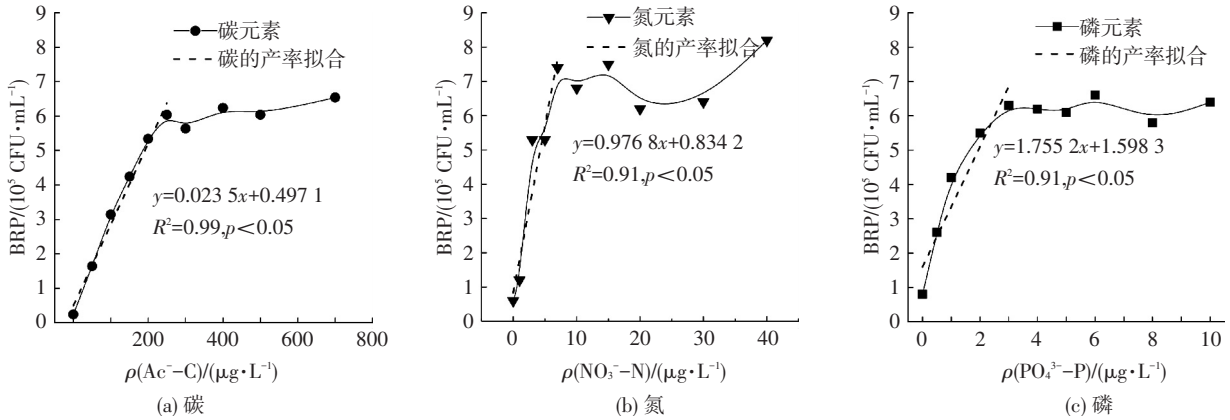


图 1　BRP 与水中碳、氮、磷质量浓度的关系

Fig.1　Relationship of BRP and carbon, nitrogen and phosphorus concentration

微生物对各种营养物质的摄取是按照一定的比例进行的,McCarty 曾提出过细菌化学实验式 $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$[19];本实验中,土著细菌生长所需的 C∶N∶P 为 250∶7∶3,即 100∶2.8∶1.2.Van der Kooij 等[7]提出对于微生物生长,最适宜的 C∶N∶P 为100∶10∶1.Sang 等[20]提出原水土著细菌再生长的 C∶P 为 100∶1.6.本实验 C∶N∶P 与前人结果相比,氮的比例偏低、磷的比例相近,可能是因为本实验采用的碳和磷是微生物易于利用的乙酸碳和正磷酸盐,而氮是硝态氮,而水体中部分微生物,如硝化细菌以氨氮为底物,不能直接利用硝态氮[21],氨化细菌以有机氮为氮源,无法利用水中无机氮[22].另外,不同细菌组成对营养元素的利用程度不同,导致可利用的营养元素比例存在差异.

研究报道表明,1 μg /L 碳可支持 10^3 ~ 10^4 cells/mL的细菌生长[6],即碳的产率系数为10^6 ~ 10^7 cells/μg,本实验碳的产率系数 2.35×10^6 CFU/μg 在该报道的范围内.此外,还应注意的是,本实验中磷的产率系数为 1.76×10^8 CFU/μg,分别是碳、氮产率系数的 74.9 倍和 1.8 倍,说明磷对细菌生长极为重要.水源水中的磷质量浓度本身就处于较低水平,常规制水工艺对磷的去除非常有效,去除率可达 90% 以上[23-24],而对 AOC 的去除效果却并不显著[25],这样就可能形成出厂水中磷元素相对缺乏的状况,使之成为管网水中细菌再生长的限制因子.因此,应对磷在管网水生物稳定性中所起的限制作用予以特别关注.

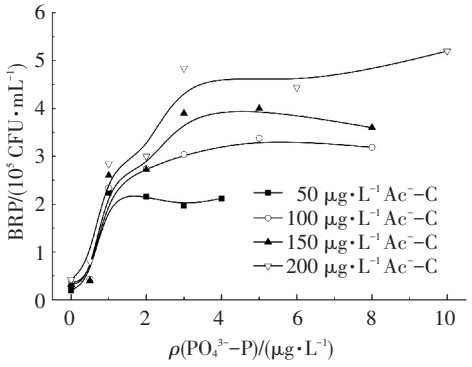
2.1.2　碳、氮、磷质量浓度共同变化对 BRP 的影响

1) 碳、磷质量浓度共同变化对 BRP 的影响.图 2为添加充足其他营养物质后,碳、磷质量浓度共同变化对 BRP 的影响.图 2(a)中,磷质量浓度在 1 μg/L以下时,增加碳质量浓度对 BRP 的影响较小,水中细菌的生长主要受磷的影响;磷质量浓度为 1~3 μg/L 时,碳、磷质量浓度共同控制细菌的生长;磷质量浓度>3 μg/L 时,增加磷质量浓度 BRP 无明显变化,此时细菌生长主要受碳质量浓度的限制.图 2(b)中,磷质量浓度为 0.5 μg/L 时,磷质量浓度过低,BRP 值维持在 1×10^5 CFU/mL 以下,细菌难以生长;磷质量浓度为 1.0 和 1.5 μg/L,碳质量浓度<50 μg/L时以及磷质量浓度为 2.0 μg/L、碳质量浓度<100 μg/L时,碳、磷两种营养物质共同控制细菌的生长,任何一种营养物质的质量浓度增加均能有效提高细菌生长的数量;碳质量浓度>100 μg/L 时,水中细菌生长的主要营养限制因子为磷.

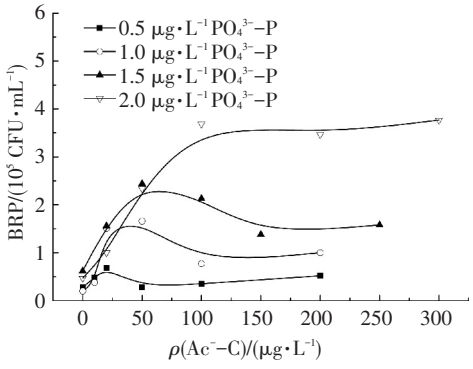
表 3、4 为 BRP 达到稳定时,分别对应图 2(a)、(b)的磷、碳的产率系数.可以看出,随着碳(磷)质量浓度的增加,BRP 达到稳定时磷(碳)的产率系数基本呈上升趋势,且低于碳(磷)充足时磷(碳)的产率系数,表明碳(磷)质量浓度不足时,会降低磷(碳)支持细菌再生长的潜力.此外,磷质量浓度为 0.5 μg/L时,碳的产率系数经线性拟合计算为负值,磷质量浓度为 1.0 及 1.5 μg/L 时,碳的产率系数线性拟合相关性较差,说明体系中磷质量浓度过低会严重影响微生物对碳的吸收利用.

2) 碳、氮质量浓度共同变化对 BRP 的影响.图 3为添加充足其他营养物质后,碳、氮质量浓度共同变化对 BRP 的影响.可以看出,碳、氮元素均可能影响细菌生长繁殖的水平.水样中的氮质量浓度<4.5 μg/L、碳质量浓度<100 μg/L 时,由于营养条件不能满足细菌细胞合成和代谢的基本需求,两种营养元素质量浓度的增加均能提高细菌生长的数量;氮质量浓度<4.5 μg/L、碳质量浓度>100 μg/L

时，碳质量浓度对 BRP 的影响较小，氮质量浓度控制着细菌的生长能力；氮质量浓度在 4.5～7 μg/L、碳质量浓度<200 μg/L 时，BRP 重新受到碳、氮质量浓度的共同影响；氮质量浓度高于 7 μg/L、碳元素质量浓度<200 μg/L 时，BRP 主要受碳质量浓度的影响，碳元素的质量浓度越高，BRP 值越大.



(a) 不同碳质量浓度下 BRP 与磷质量浓度的关系



(b) 不同磷质量浓度下 BRP 与碳质量浓度的关系

图 2　BRP 与碳、磷质量浓度的关系

Fig.2　Relationship of BRP and carbon and phosphorus concentration

表 3　碳质量浓度变化时磷支持细菌再生长的产率系数

Tab.3　Yield values for heterotrophic bacteria of phosphorus when carbon concentration changes

ρ(碳)/(μg·L⁻¹)	BRP 达稳定时磷质量浓度/(μg·L⁻¹)	磷的产率系数/(10⁸ CFU·μg⁻¹)
50	2	1.09(R^2=0.72, p>0.05)
100	3	1.00(R^2=0.83, p<0.05)
150	3	1.21(R^2=0.86, p<0.05)
200	3	1.43(R^2=0.91, p<0.05)
充足	3	1.76(R^2=0.91, p<0.05)

表 4　磷质量浓度变化时碳支持细菌再生长的产率系数

Tab.4　Yield values for heterotrophic bacteria of carbon when phosphorus concentration changes

ρ(磷)/(μg·L⁻¹)	BRP 达稳定时碳质量浓度/(μg·L⁻¹)	碳的产率系数/(10⁶ CFU·μg⁻¹)
0.5	100	−0.11(R^2=0.07, p>0.05)
1.0	100	0.48(R^2=0.09, p>0.05)
1.5	150	0.35(R^2=0.09, p>0.05)
2.0	150	2.24(R^2=0.87, p<0.05)
充足	250	2.35(R^2=0.99, p<0.05)

表 5、6 为 BRP 达到稳定值时，分别对应图 3(a)、(b) 氮、碳的产率系数.可以看出，随着碳(氮)质量浓度增加，BRP 达稳定值时氮(碳)的产率系数呈上升趋势，且低于碳(氮)充足时的产率系数，表明碳(氮)质量浓度不足时，会降低氮(碳)支持细菌再生长的潜力.

表 5　碳质量浓度变化时氮支持细菌再生长的产率系数

Tab.5　Yield values for heterotrophic bacteria of nitrogen with different carbon concentration

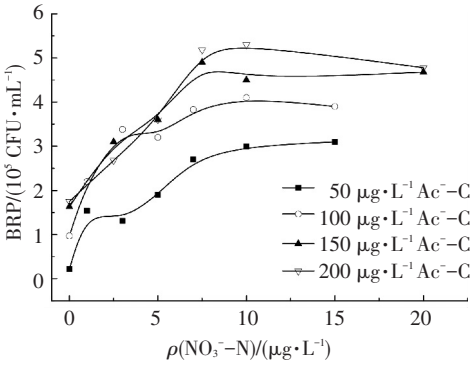
ρ(碳)/(μg·L⁻¹)	BRP 达稳定时氮质量浓度/(μg·L⁻¹)	氮的产率系数/(10⁷ CFU·μg⁻¹)
50	7	2.84(R^2=0.81, p<0.05)
100	7	3.57(R^2=0.80, p<0.05)
150	7	4.12(R^2=0.97, p<0.05)
200	7	4.48(R^2=0.98, p<0.05)
充足	7	9.76(R^2=0.91, p<0.05)

表 6　氮质量浓度变化时碳支持细菌再生长的产率系数

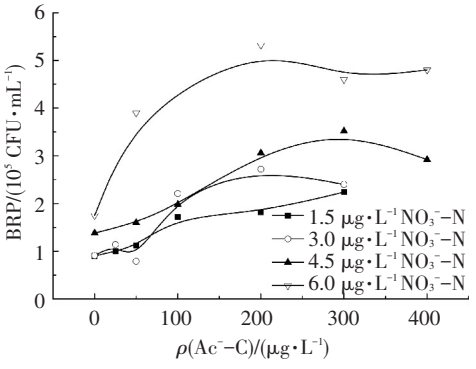
Tab.6　Yield values for heterotrophic bacteria of carbon with different nitrogen concentration

ρ(氮)/(μg·L⁻¹)	BRP 达稳定时碳质量浓度/(μg·L⁻¹)	碳的产率系数/(10⁶ CFU·μg⁻¹)
1.5	—	—
3.0	200	1.00(R^2=0.85, p<0.05)
4.5	200	0.86(R^2=0.97, p<0.05)
6.0	200	1.59(R^2=0.95, p<0.05)
充足	250	2.35(R^2=0.98, p<0.05)

注：氮质量浓度为 1.5 μg/L 时，BRP 稳定时在图上表征不明显，故未参与计算.



(a) 不同碳质量浓度下 BRP 与氮质量浓度的关系

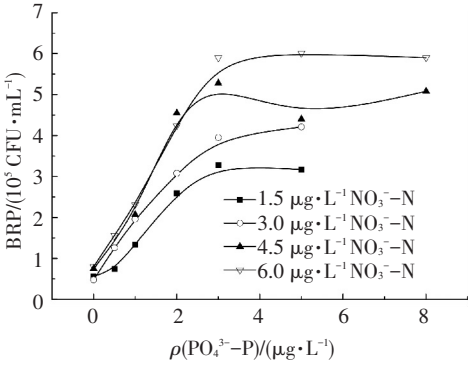


(b) 不同氮质量浓度下 BRP 与碳质量浓度的关系

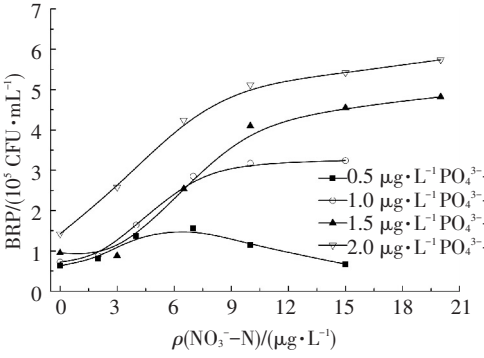
图 3　BRP 与碳、氮质量浓度的关系

Fig.3　Relationship of BRP and carbon and nitrogen concentration

3）氮、磷质量浓度共同变化对 BRP 的影响.图 4 为添加充足其他营养物质后,氮、磷质量浓度共同变化对 BRP 的影响.可以看出,磷质量浓度<0.5 μg/L时,添加其他任何营养物质均无法有效促进细菌的生长,表明过低的磷质量浓度无法满足细菌基本的新陈代谢;磷质量浓度在 1~3 μg/L、氮质量浓度在 4.5~10 μg/L 时,BRP 随其中任意一种营养元素质量浓度的升高而增大,此时细菌生长所需的营养物质不断得到补充,BRP 的增大效果较明显;磷质量浓度>3 μg/L 时,增加磷质量浓度对 BRP 的提高较小,细菌生长主要受氮质量浓度的限制,6.0 μg/L氮质量浓度时 BRP 值达最大,氮质量浓度>10 μg/L 时,增加氮质量浓度对 BRP 的提高较小,细菌生长主要受磷的限制.



(a) 不同氮质量浓度下 BRP 与磷质量浓度的关系



(b) 不同磷质量浓度下 BRP 与氮质量浓度的关系

图 4　BRP 与氮、磷质量浓度的关系

Fig.4　Relationship of BRP and nitrogen and phosphorus concentration

表 7、8 为 BRP 达到稳定值时,分别对应图 4(a)、(b)磷、氮的产率系数.可以看出,随着氮(磷)质量浓度增加, BRP 达到稳定值时磷(氮)的产率系数呈上升趋势,且低于氮(磷)充足时的产率系数,表明氮(磷)质量浓度不足时,会降低磷(氮)支持细菌再生长的潜力.

4)两种营养物质共同对 BRP 限制作用.本实验中,当两种营养物质共同限制时,一种营养物质的质量浓度低于细菌生长需求时,会导致另一种营养物质支持细菌再生长能力的下降,表现在另一种营养物质的产率系数低于其在营养物质充足环境中的产率系数,且随着营养物质浓度的增加而升高.国内已有学者开展过两种营养物质共同对细菌再生长限制作用的实验.文献[26]表明,当碳质量浓度分别为 50、100 和 200 μg/L 时,磷对悬浮菌再生长的产率系数分别为 5.6×10^8、8.8×10^8和 2.0×10^9 CFU/μg,产率系数随碳质量浓度的增加而上升,与本实验结论相似.文献[27]表明,以碳 100 μg/L、氮 50 μg/L、磷 5 μg/L 作为基础水平,微生物再生长的碳、氮、磷的限值分别为 100、20 和 2 μg/L,碳、氮、磷的产率系数分别为 8.37×10^5,3.19×10^6和 3.59×10^7 CFU/μg,与本实验结果相比均偏低,可能是因为其所采取的其他营养物质的基础质量浓度对细菌生长不足,影响细菌对所研究营养物质的利用水平.

表 7　氮质量浓度变化时磷支持细菌再生长的产率系数

Tab.7　Yield values for heterotrophic bacteria of phosphorus with different nitrogen concentration

ρ(氮)/(μg · L⁻¹)	BRP 达稳定时磷质量浓度/(μg · L⁻¹)	磷的产率系数/(10⁸ CFU · μg⁻¹)
1.5	3	0.98(R^2=0.98, p<0.05)
3.0	3	1.15(R^2=0.99, p<0.05)
4.5	3	1.61(R^2=0.96, p<0.05)
6.0	3	1.73(R^2=1.00, p<0.05)
充足	3	1.76(R^2=0.91, p<0.05)

表 8　磷质量浓度变化时,氮支持细菌再生长的产率系数

Tab.8　Yield values for heterotrophic bacteria of nitrogen with different phosphorus concentration

ρ(磷)/(μg · L⁻¹)	BRP 达稳定时氮质量浓度/(μg · L⁻¹)	氮的产率系数/(10⁷ CFU · μg⁻¹)
0.5	7	1.43(R^2=0.92, p<0.05)
1.0	10	2.75(R^2=0.95, p<0.05)
1.5	10	3.36(R^2=0.90, p<0.05)
2.0	10	3.80(R^2=0.99, p<0.05)
充足	7	9.76(R^2=0.91, p<0.05)

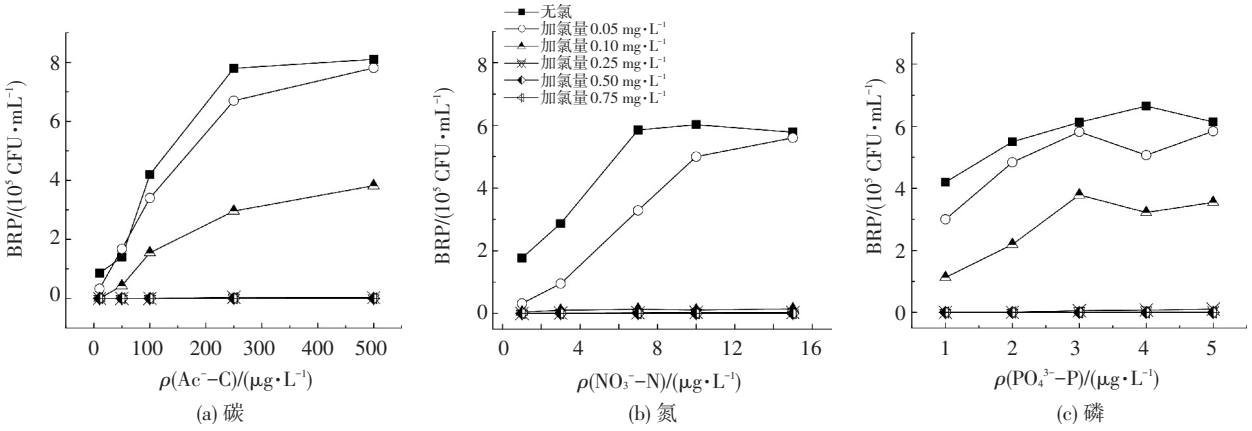
另外,值得注意的是,图 2(b)和图 4(b)中,磷质量浓度为 0.5 μg/L 时,增加其他任何营养物质的质量浓度均无法有效促进细菌的生长,BRP 值维持在 1×10^5 CFU/mL 以下,表明磷质量浓度低于 0.5 μg/L可有效控制细菌的再生长.姜登岭[26]认为,实际管网中磷质量浓度低于 0.7 μg/L 并尽量减小管网水力停留时间,水样可实现生物稳定.

综上,对于各种营养物质均较贫乏的给水管网环境,应当对细菌生长所必需的各种营养元素质量浓度进行检测,综合分析找出水中细菌生长的限制因子,为提高管网水生物稳定性提供支持.

2.2　氯与营养物质的共同作用对 BRP 的影响

图 5 为含氯水中 BRP 与碳、氮、磷质量浓度的关

系.在含氯水环境中,细菌对营养元素的利用受到了限制.加氯量为 0.05 mg/L 时,水中细菌的生长规律与无氯环境中相似,细菌再生长能力随营养物质质量浓度的增加而提高.随着加氯量的增加,细菌繁殖受到的抑制趋势逐渐增强,BRP 呈下降趋势,加氯量≥0.50 mg/L时,各体系中 BRP 均保持在500 CFU/mL以下,即水中大部分细菌被灭活,增加各种营养物质的质量浓度并不能促进细菌增长,微生物再生长风险较低. Gillespie 等[5]利用流式细胞仪监测供水管网中总细胞质量浓度和完整细胞质量浓度时发现,在氯化消毒系统中,当自由氯质量浓度高于 0.5 mg/L 时,管网中完整细胞质量浓度的比例大幅减少.加氯量≥0.50 mg/L时,本实验结果满足美国环保局二级推荐标准设定的 HPC<500 CFU/mL要求[28],细菌生长得到有效控制.



(a) 碳　(b) 氮　(c) 磷

图 5　含氯水中 BRP 与碳、氮、磷元素质量浓度的关系

Fig.5　Relationship between BRP and carbon, nitrogen, phosphorus concentration, respectively with different chlorine residuals

3　结　论

1)单一营养物质质量浓度不足时,水源细菌生长的碳、氮、磷营养物质质量浓度的临界值分别为 250、7 和 3 μg/L.碳、氮、磷对 BRP 的产率系数分别为 2.35×10^6、9.76×10^7 和 1.76×10^8 CFU/μg.细菌生长所需 C∶N∶P 为 100∶2.8∶1.2.

2)水体中的其他营养物质足量,对于碳、氮、磷 3 种营养物质,当其中两种营养物质质量浓度不足时,相对质量浓度较低的营养物质为 BRP 主要限制因子,不仅会引起水体 BRP 的下降,还可导致其他营养物质支持细菌再生长能力的下降.磷质量浓度为 0.5 μg/L 时,增加其他任何营养物质的质量浓度均无法有效促进细菌的生长,即管网水中磷质量浓度低于 0.5 μg/L 可有效控制细菌的再生长.

3)随加氯量增加,BRP 呈降低趋势;加氯量≥0. 50 mg/L时,细菌生长得到有效控制.

参考文献

[1] ASHBOLT N J. Microbial contamination of drinking water and human health from community water systems [J]. Current Environmental Health Reports, 2015, 2(1): 95-106.

[2] WOLYNIAK D, ELIZABETH A. Impact of biofilm and other environmental factors on the fate and transport of Cryptosporidium oocysts [D]. Bethlehem: Lehigh University, 2011.

[3] 王华然, 尹静. 饮用水生物稳定性研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(4): 367-370.
WANG Huaran, YIN Jing. Advances on biological stability of drinking water [J]. Journal of Environment and Health, 2009, 26(4): 367-370.

[4] LU Pinpin, CHEN Chao, WANG Qingfeng, et al. Phylogenetic diversity of microbial communities in real drinking water distribution systems [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2013, 18(1): 119-124.

[5] GILLESPIE S, LIPPHAUS P, GREEN J, et al. Assessing microbiological water quality in drinking water distribution systems with disinfectant residual using flow cytometry [J]. Water Research, 2014, 65(15): 224-234.

[6] PREST E I, HAMMES F, LOOSDRECHT VAN M C M, et al. Biological stability of drinking water: Controlling factors, methods, and challenges [J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7(45):1-24.

[7] KOOIJ VAN DER D, VISSER A, HIJNEN W. Determining the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water [J]. Journal (American Water Works Association), 1982, 74(10): 540-545.

[8] SERVAIS P, BILLEN G, HASCOËT M. Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters [J]. Water Research, 1987, 21(4): 445-450.

[9] KOOIJ VAN DER D. Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth [J]. Journal (American Water Works Association), 1992,84(2): 57-65.

[10] LECHEVALLIER M W, WELCH N J, SMITH D B. Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, 62(7): 2201-2211.

[11] DUKAN S, LEVI Y, PIRIOU P, et al. Dynamic modelling of bacterial growth in drinking water networks [J]. Water Research, 1996, 30(9): 1991-2002.

[12] MIETTINEN I T, VARTIAINEN T, MARTIKAINEN P J. Phosphorus and bacterial growth in drinking water [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(8): 3242-3245.

[13] 桑军强, 张锡辉, 周浩晖, 等. 总磷作为饮用水生物稳定性控制

指标的研究 [J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 720-724.
SANG Junqiang, ZHANG Xihui, ZHOU Haohui, et al. Study on total phosphorus as an indicator of drinking water biostability [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 720-724.

[14] SATHASIVAN A, OHGAKI S, YAMAMOTO K, et al. Role of inorganic phosphorus in controlling regrowth in water distribution system [J]. Water Science and Technology, 1997, 35 (8): 37-44.

[15] LEHTOLA M J, MIETTINEN I T, VARTIAINEN T, et al. Changes in content of microbially available phosphorus, assimilable organic carbon and microbial growth potential during drinking water treatment processes [J]. Water Research, 2002, 36(15): 3681-3690.

[16] SATHASIVAN A, OHGAKI S. Application of new bacterial regrowth potential method for water distribution system-a clear evidence of phosphorus limitation [J]. Water Research, 1999, 33 (1): 137-144.

[17] 叶林, 于鑫, 施旭,等. 用细菌生长潜力 (BGP) 评价饮用水生物稳定性 [J]. 给水排水, 2008, 33(11): 146-149.
YE Lin, YU Xin, SHI Xu, et al. Evaluation of drinking water biostability using bacterial growth potential (BGP) [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 33(11): 146-149.

[18] REASONER D J, GELDREICH E E. A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1985, 49(1): 1-7.

[19] 顾夏声. 废水生物处理数学模式 [M].2 版.北京:清华大学出版社, 1993.
GU Xiasheng. Mathematical model of biological treatment of wastewater [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.

[20] SANG Junqiang, ZHANG Xihui, LI Lingzhi, et al. Improvement of organics removal by bio-ceramic filtration of raw water with addition of phosphorus[J]. Water Research, 2003, 37(19): 4711-4718.

[21] 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 等. 沣河水系脱氮微生物群落结构研究 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1451-1456.
SUN Yujiao, ZHAO Xuan, WANG Lei, et al. Study on the microorganisms of nitrogen cycle in Fenghe river [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(9): 1451-1456.

[22] 郭端强, 方改霞, 段敬霞,等. 河南省白龟山水库下游水体氨化细菌分离鉴定及其降解有机氮条件[J]. 微生物学通报, 2014, 41(2): 236-242.
GUO Duanqiang FANG Gaixia, DUAN Jingxia, et al. Isolation and identification of ammonifying bacteria in the downstream waters of Baiguishan Reservior in Henan Province and conditions of degrading organic nitrogen [J]. Microbiology China, 2014, 41(2): 236-242.

[23] NISHIJIMA W, SHOTO E, OKADA M. Improvement of biodegradation of organic substance by addition of phosphorus in biological activated carbon [J]. Water Science and Technology, 1997, 36(12): 251-257.

[24] 桑军强, 李灵芝, 王占生. 饮用水净化工艺中磷的去除研究 [J]. 中国环境科学, 2003, 23(2): 78-80.
SANG Junqiang, LI Lingzhi, WANG Zhansheng. Studies on the removal of phosphorus in drinking water purificationtechnology [J]. China Environmental Science, 2003, 23(2): 78-80.

[25] 张领国, 张克峰, 李梅,等. 饮用水水质生物稳定性研究进展 [J]. 净水技术, 2013, 32(6): 1-5.
ZHANG Linguo, ZHANG Kefeng, LI Mei, et al. Advances in research of biological stability for drinking water quality [J]. Water Purification Technology, 2013, 32(6): 1-5.

[26] 姜登岭. 营养基质对管网水悬浮菌再生长的影响研究[D].北京:清华大学, 2004.
JIANG Denglin. Effects of nutrients bacteria regrowth on suspended in water distribution drinking systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

[27] 廖一鸣. 上海市城市供水系统微生物再生机理及其控制技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
LIAO Yiming. Study on the mechanism of microbial regrowth andrestriction technique in Shanghai drinking water supply system [D] .Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.

[28] USEPA (US Environmental Protection Agency). 40 CFR Parts 141 and 142. Drinking water; National Primary drinking water regulation; Filtration, disinfection; turbidity, Giardia lamblia, viruses, Legionella, and heterotrophic bacteria; Final Rule [S]. Federal Register, 1989.

(编辑 刘 彤)