

尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 2009 温度对短程硝化反硝化的影响 [J]. 环境科学学报, 29(3): 516– 520
Shang H L, Peng Y Z, Zhang J R, *et al*. 2009 The effect of temperature on short-cut nitrification and denitrification[J]. A cta Scientiae Circumstantiae
29(3): 516– 520

温度对短程硝化反硝化的影响

尚会来, 彭永臻*, 张静蓉, 王淑莹

北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124

收稿日期: 2008-04-28 录用日期: 2009-01-09

摘要: 以间歇式活性污泥法 (SBR) 处理生活污水, 系统考察了温度变化对短程硝化反硝化稳定性和硝化反硝化速率的影响. 结果表明: 在较高温度下 ((28±1)℃), 通过实时控制和控制污泥龄在 10d 左右, 可以成功实现短程硝化反硝化. 在此基础上对完全亚硝酸盐型硝化的污泥 (NO₂⁻-N/NO_x⁻-N≈ 1) 进行降温实验, 每降 1℃ 稳定一个多月, 半年后不刻意控制温度, 经历了冬季 10℃ 的低温, 成功的稳定了常温、低温短程硝化反硝化, 亚硝化率始终维持在 78.8% 以上. 实验发现降低温度后对于 AOB 和 NOB 的活性都有很大的影响, 但对于 AOB 的影响要大于 NOB 对比氨氧化速率的影响大于比反硝化速率的影响. 26℃ 条件下的比氨氧化速率和比反硝化速率分别是 10℃ 条件下的 4.49 和 2.91 倍. 可见降低温度对于短程系统硝化反应的影响要大于反硝化的影响.

关键词: 低温常温; 短程硝化反硝化; 稳定

文章编号: 0253-2468(2009)03-516-05 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

The effect of temperature on short-cut nitrification and denitrification

SHANG Huilai, PENG Yongzhen*, ZHANG Jingrong, WANG Shuying

Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124

Received 28 April 2008 accepted 9 January 2009

Abstract The effect of temperature on the stabilization of short-cut nitrification and denitrification together with the rates of nitrification and denitrification were studied in a Sequencing Batch Reactor (SBR) treating domestic wastewater. The experimental results demonstrated that real-time control and controlling sludge retention time (SRT=10d) could realize short-cut nitrification and denitrification. Experiments were carried out by decreasing the temperature of the system whenever the nitrite accumulation reached at least 0.9 (NO₂⁻-N/NO_x⁻-N≈ 1). The system was held at each temperature for at least a month. After six months, the nitrite accumulation exceeded 78.8%, even at 10℃ in winter. The results also showed that temperature had a great effect on the activities of AOB and NOB, especially AOB. The specific ammonia oxidation rate and the specific denitrification rate were 4.49 and 2.91 times higher respectively, at 26℃ than at 10℃. It is obvious that decreasing the temperature had more effect on nitrification than on denitrification in this short-cut system.

Keywords low temperature/nomal temperature; short-cut nitrification and denitrification; stabilization

1 引言 (Introduction)

目前水体富营养化现象日趋严重, 而现有污水处理 厂普遍采用一级、二级处理工艺, 相对比较落后, 为适应日趋严格的污水排放标准, 许多污水处理厂需要对原有的脱氮除磷工艺进行改造 (谢雄飞, 2000), 而面对目前众多的污水脱氮除磷新工艺, 最经济高效、应用广泛和发展较快的还是生物

脱氮除磷工艺, 如: 短程硝化反硝化、同步硝化反硝化、厌氧氨氧化等, 他们都是生物脱氮新工艺, 同时也都受到温度的影响, 尤其在我国北方许多污水处理厂一年四季温度变化较大, 因此, 研究温度的变化对于污水脱氮过程中硝化反硝化的影响, 对于指导污水处理厂工艺改造具有很强的现实意义.

目前, 关于短程硝化反硝化的实现和稳定的研究大多集中在较高温度 (28℃以上), 高温条件下实

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目 (No. 2006BAC19B03); 北京市教委科研基地——科技创新平台项目

Supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the Eleventh Five-year Plan Period (No. 2006BAC19B03) and the Project of Scientific Research Base and Scientific Innovation Platform of Beijing Municipal Education Commission

作者简介: 尚会来 (1982—), 男, E-mail: shanghuilai007@yahoo.com.cn * 通讯作者 (责任作者)

Biography: SHANG Huikai (1982—), male, E-mail: shanghuikai007@yahoo.com.cn * Corresponding author

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现短程硝化反硝化的报道较多, 而对于低温和常温条件下稳定短程硝化反硝化的报道甚少, 对于实际的污水处理厂将进水加热到 28℃更不太现实, 所以研究低温常温条件下短程硝化反硝化的稳定和反应速率的影响有较高的研究意义. 本试验利用 SBR 反应器, 经过一年多的试验, 主要考察了温度对于短程硝化反硝化的实现与稳定的影响. 温度变化范围从 28~ 10℃, 成功的实现了短程硝化反硝化的稳定. 试验较全面的考察了不同温度下亚硝酸盐型硝化反硝化的稳定性和反应速率的变化.

2 材料方法 (Materials and methods)

2.1 试验用水水质及种泥

试验用废水取自北京工业大学家属区生活污水. 水质见表 1. 接种污泥为北京某城市污水处理厂的回流污泥, 实验初期以生活污水连续培养 2个月.

表 1 试验用水水质

Table 1 Influent characteristics

			mg L ⁻¹
COD	TOC	NH ₄ ⁺ -N	TN
169.94	53.92	58.65	71.22

2.2 试验装置与运行

试验装置如图 1所示. 所用反应器为圆柱形, 总有效容积为 14L. 反应器以黏砂块作为微孔曝气头, 采用鼓风曝气, 转子流量计调节曝气量, 并设有搅拌机.

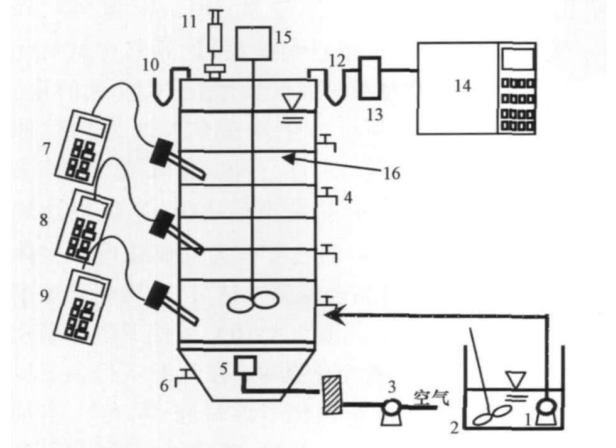


图 1 SBR 试验装置示意图 (1 水泵; 2 水箱; 3 曝气泵; 4 取水样口; 5. 曝气头; 6. 排泥管; 7. pH 测定仪; 8 DO 测定仪; 9. ORP 测定仪; 10. 压力调节器及压力计; 11 气体采样口; 12 气体干燥管; 13. 气体采样袋; 14 气相色谱仪; 15. 搅拌机; 16 加热电阻)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system with control equipment in the SBR process

试验采用一个 SBR 反应器, 利用在线监测的 pH、DO、ORP 作为控制参数实时控制, 准确控制硝化和反硝硝化结束时间, 反应器停止曝气后投加足够乙醇作为反硝化电子供体进行反硝化.

2.3 分析方法

分别使用 Multi340 i 型 (WTW 公司) 便携式多功能 DO、pH 值和 ORP 测定仪测定. 试验中 COD、NH₃⁻-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 MLSS 的分析方法均采用国家环境保护总局发布的标准方法. TOC 及 TN 使用 multi N /C 3000 型 (Analytik Jena AG 公司) TOC /TN 分析仪测定.

2.4 试验方案

所有试验, 好氧过程中均维持恒定的曝气量 80m³·h⁻¹, 反应初始氨氮和 COD 分别维持在 60 mg·L⁻¹ 和 170mg·L⁻¹ 左右, MLSS 维持在 3500 mg·L⁻¹ 左右. 为了考察温度对硝化类型的影响, 首先在高温条件下 ((28±1)℃), 通过实时控制和适当的排泥控制污泥龄在 10d 左右, 淘洗掉系统中的亚硝酸盐氧化菌 (NOB), 实现短程硝化反硝化. 在此基础上对完全亚硝酸盐型硝化的污泥 (NO₂⁻-N / NO_x⁻-N≈ 1), 首先进行降温试验, 每降低 1℃, 运行一个多月以使系统适应该温度, 目的在于维持降温后的短程硝化效果, 逐渐降低温度, 最后去掉加热, 使反应器中的水温与自然环境一致. 同时考察降温对于短程硝化反硝化速率的影响.

3 结果 (Results)

3.1 温度对于短程硝化反硝化的实现和稳定的影响

目前文献报道对于短程硝化反硝化多在高温的条件下可以实现和稳定, 而对于常温和低温条件下的稳定报道很少 (Hellings, 1998). 本试验首先利用较高温度条件下 ((28±1)℃), 利用实时控制和控制较短污泥龄的方法, 经过一个多月的驯化成功的实现了短程硝化反硝化. 图 2 所示为一个周期内的三氮和 pH、DO、ORP 变化规律, 从图中可以看到在第 180min 时, NH₄⁺-N 已经降解结束, 而在 pH、DO 曲线上的突跃点和 NH₄⁺-N 降解结束的点有很好的相关性, 如图 2 中 A 点, pH 曲线上的表征硝化结束的点 A 称之为“氨谷”, 此刻系统中 NO₂⁻-N 达到最高值, 继续曝气由于 NH₄⁺-N 已经降解结束, 系统的供氧速率大于好氧速率, DO 出现大幅上升, 之后逐渐接近供氧速率达到平稳, 亚硝化过程结束, 系统

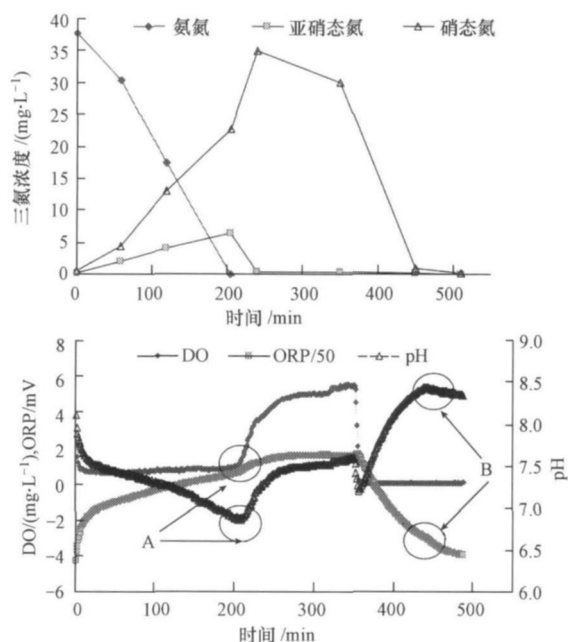


图 2 一个周期内典型的三氮和 pH、DO、ORP 变化规律

Fig 2 Nitrogen content, pH, DO and ORP during one cycle

不会再产生 H^+ 离子, 同时由于进一步曝气的吹脱作用导致了 pH 的上升, 所以硝化阶段利用 pH、DO 的变化规律很好地控制曝气时间, 不仅可以节约曝气费用, 还能有效控制 $NO_2^- - N$ 的积累, 防止过度曝气使得 $NO_2^- - N$ 向 $NO_3^- - N$ 转化. 因此应用实时控制可实现短程硝化反硝化 (Peng *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004; 高景峰等, 2002). 在反硝化结束时, pH 和 ORP 曲线上也会有相应的变化点与之对应, 如图中的 B 点, 称之为“硝酸盐膝”.

本试验在高温条件下, 采用实时控制策略和适当排泥控制较短污泥龄相结合的控制方法, 经过一个多月的驯化成功的实现了短程硝化反硝化, 并且经过了近一年的降温试验成功的维持了低温、常温条件下的短程硝化反硝化, 图 3 给出了温度从 28~10℃ 变化过程中, 亚硝化率随温度降低的变化规律.

本试验在 28℃ 下实现短程硝化一个月后, 降低温度到 27℃, 在温度调低的开始阶段亚硝化率有所下降, 但随着实时控制和污泥龄的控制, 系统逐渐适应了该温度, 亚硝化率又有所回升, 稳定了两个月后, 继续降低温度到 26℃, 此刻系统的亚硝化率没有下降, 反而有小幅上升, 同样稳定了一个多月后, 去掉加热棒, 使反应器中水温随环境中室温变化, 由于此时正值 8 月中旬, 室温能够达到 30℃ 以上, 反应器中水温为 24.5℃, 系统依旧维持了较高的亚硝化率. 进入 10 月随着气温的下降, 水温也逐

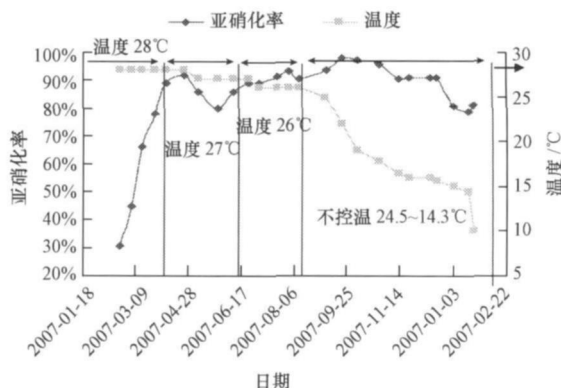


图 3 亚硝化率与温度变化曲线

Fig 3 Nitrite accumulation rates and temperature regime

渐下降, 从 8 月中旬到 1 月中旬水温从 24.5℃ 逐渐下降到了 14.3℃, 由于冬季试验室内有暖气, 水温最低达到了 14℃ 左右, 在这个不控温的过程中, 系统的亚硝化率随温度下降有所波动, 当温度低于 15℃ 后亚硝化率有所下降, 后利用冰水的水浴冷却系统, 将水温降至 10℃, 发现系统的亚硝化率也没有发生大幅的下降. 经历了一年四季, 温度由高到低的变化, 成功地实现了低温、常温条件下的短程硝化反硝化的稳定, 亚硝化率始终维持在 78.8% 以上.

3.2 温度对于短程硝化反硝化速率的影响

图 4 为 26℃ 条件下短程硝化反硝化一周期内三氮变化规律, 从图中可以看出在硝化过程中系统以 $NO_2^- - N$ 积累为主, $NO_3^- - N$ 始终低于 $5 mg/L$, 亚硝化率达到了 91.2%, 进水 $NH_4^+ - N$ 值 $43.16 mg/L$, 在第 240 min 就已经结束, 计算其比氨氧化速率 (单位微生物量单位时间内氧化 $NH_4^+ - N$ 的量) 和比反硝化速率 (单位微生物量单位时间内还原 $NO_2^- - N$ 的量). 26℃ 条件下比氨氧化速率为 $0.148 mg \cdot mg^{-1} \cdot d^{-1}$. 硝化结束后 $NO_2^- - N$ 浓度达到 $42.1 mg/L$, 投加足够的乙醇作为反硝化电子供体后, 需要 60 min 即可完全反硝化结束, 比反硝化速率为 $0.577 mg \cdot mg^{-1} \cdot d^{-1}$. 图 5 为 16℃ 条件下短程硝化反硝化一周期内三氮变化规律. 在低温下仍主要以亚硝酸盐积累为主, 亚硝化率维持在 88.6%, 本周期内系统进水 $NH_4^+ - N$ 值为 $43.45 mg/L$, 硝化需要 545 min 才能完成. 较 26℃ 相比, 16℃ 下硝化时间延长了 2.3 倍, 其比氨氧化速率为 $0.039 mg \cdot mg^{-1} \cdot d^{-1}$. 反硝化结束后 $NO_2^- - N$ 浓度达到 $30.51 mg/L$, 同样投加足够的乙醇作为反硝化电子供体后, 也需要 60 min 完全反硝化结束, 比反硝化速率为 $0.249 mg \cdot mg^{-1} \cdot d^{-1}$.

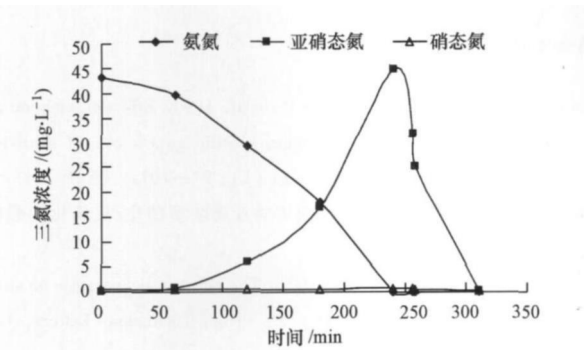


图 4 26℃条件下一个周期内三氮变化规律

Fig. 4 Nitrogen species concentrations during one cycle at 26℃

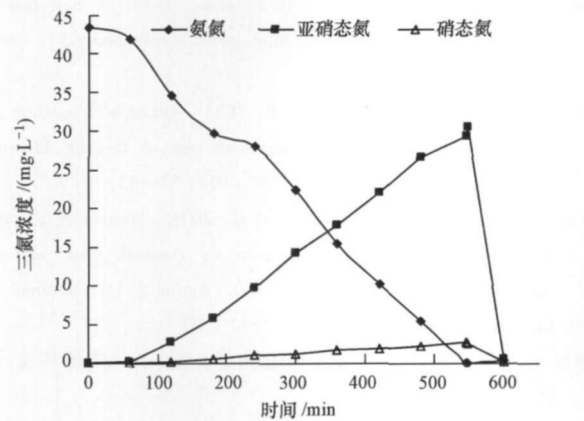


图 5 16℃条件下一个周期内三氮变化规律

Fig. 5 Nitrogen species concentrations during one cycle at 16℃

表 2 为不同温度下短程硝化反硝化的比氨氧化速率和比反硝化速率, 温度对于其反应速率有很大的影响, 26℃条件下的比氨氧化速率和比反硝化速率分别是 10℃条件下的 4.49 和 2.91 倍. 可见, 降低温度对于短程系统硝化反应的影响要大于反硝化的影响.

表 2 温度对短程硝化反硝化速率的影响

Table 2 Effect of temperature on short-cut nitrification and denitrification rates

温度 /℃	比氨氧化速率 / ($\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	比反硝化速率 / ($\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
26	0.148	0.577
20	0.118	0.373
16	0.039	0.249
10	0.033	0.198

3.3 讨论 (Discussion)

温度不仅影响细菌的比增长速率, 而且会影响细菌的活性. 一般认为, 氨氧化细菌的最大比增长速率与温度之间遵循 Arrhenius 方程, 温度每升

10℃, 最大比增长速率增加 1 倍. 在 5~30℃, 随着温度的升高, 硝化反应速率也增加. 温度过高, 蛋白质的变性降低了细菌的活性, 硝化速率也会降低. 当温度低于 4℃, 亚硝酸盐氧化细菌的生命活动几乎停止 (Antonioua 1990). 本试验的温度范围在 28~10℃之间, 在低温条件下, 活性污泥系统的整体活性都在下降, 而自养硝化菌群中无论是 AOB 还是 NOB 对低温都比较敏感, 由表 2 可见尤其对于 AOB 来说, 其受低温的影响更大, 如何在保证好的脱氮效果同时, 实现短程硝化或者说维持短程硝化, 也是目前短程硝化研究的难点.

本试验首先强化了常温条件下 AOB 的硝化性能, 使其逐渐适应低温的环境, 保证氨氧化效果, 在低温短程硝化的实现从中温、常温状态开始入手, 在中温、常温状态时, 逐渐驯化培养, 优化硝化菌群的结构, 通过调节运行方式、控制手段等方法使 AOB 成为硝化菌群中的绝对优势菌种, 并将 NOB 尽可能多地从系统中淘汰出去. 这样, 当系统进入冬季的低温环境时, 才有可能继续维持短程硝化. 本试验从秋季进入冬季的过程中, 没有刻意地调节温度, 加上冬季室内有暖气, 为系统内的 AOB 逐渐适应低温条件创造了极为有利的条件. 从微生物学角度, Jones (1988) 认为, 如果将 AOB 从 30℃的条件下直接转移到 5℃的环境中, 会导致它们失活, 但若逐步适应, AOB 能够根据温度变化逐渐调整细胞膜中的脂肪酸类型, 使其中的长链饱和脂肪酸部分转化为短链不饱和脂肪酸, 以使其在低温条件下不易“冻结”, 但这需要一定时间的培养和驯化. 本试验结果正是与这个结论相吻合, 每降低 1℃就维持这个状态一个月左右的时间, 逐步降温, 因此, 强化了低温条件下 AOB 的硝化性能, 保证了氨氧化的效果, 同时, 应用实时过程控制也为氨氧化的进行提供了保证. 在低温条件下, pH 值在氨氧化结束时, 依然可以出现变化点“氨谷”, 短程硝化仍然可以通过实时控制来稳定. 以 pH 值作为控制参数, 准确把握氨氧化和反硝化的终点, 既能保证脱氮效果, 也防止了过度曝气而引起的亚硝化率降低. 系统从中温、常温状态就一直应用在线实时控制来稳定短程硝化, 随着每个周期剩余污泥的不断排放, 系统中的 NOB 被不断淘汰, 经过近半年的时间, AOB 已成为硝化菌群中的绝对优势菌种, 因此, 在进入低温阶段后, 继续维持了短程硝化.

综上所述, 在实际 SBR 法污水厂的运行过程

中,可先在温度较高的条件下,通过优化运行方式与实时控制快速实现短程硝化,并通过实时控制等手段稳定短程硝化,不断优化污泥种群结构,在进入冬季低温阶段后采用适当的方法使温度的变化不要过于剧烈,并严格进行硝化过程的实时控制,实现和稳定低温短程硝化是完全有可能的.

4 结论 (Conclusions)

1) 在较高温条件下 (28 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,通过实时控制和控制污泥龄在 10d 左右的控制手段,经过两个月的培养,淘洗掉系统中的亚硝酸盐氧化菌 (NOB),成功实现了短程硝化反硝化.

2) 利用实时控制策略和逐渐减低温度,并稳定一个多月的方法,成功地维持了常温和低温条件下的短程硝化反硝化.

3) 温度降低后对于 AOB 和 NOB 的活性都有很大的影响,但对于 AOB 的影响要大于 NOB,对比氨氧化速率的影响大于比反硝化速率的影响.

责任作者简介: 彭永臻 (1949—),男,博士,教授 (博士生导师). 研究方向为污水生物处理的理论与应用、污水处理系统的自动控制与智能控制、水环境与污水处理工程的管理信息系统. E-mail: py@bjut.edu.cn

参考文献 (References):

- Antoniou P, Hamilon J, Koopman B, *et al*. 1990. Effect of temperature and pH on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria [J]. *Water Research* 24 (1): 97—101
- 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. 2002. 温度对亚硝酸盐型硝化/反硝化的影响 [J]. *高技术通讯*, 12: 88—93
- Gao JF, Peng YZ, Wang SY. 2002. The effect of temperature on short cut nitrification/denitrification [J]. *High Technology Letters* 12: 88—93 (in Chinese)
- Hellings G, Schellen A A J C, Mukler JW, *et al*. 1998. The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich wastewater [J]. *Water Sci Tech* 37 (9): 135—142
- Jones R D, Morita R Y, Koops H P, *et al*. 1988. A new marine ammonium-oxidizing bacterium *Nitrosomonas cryoblenans* [J]. *Can J Microbiol* 34: 1122—1128
- Peng Y Z, Chen Y, Peng C Y, *et al*. 2004. Nitrite accumulation by aeration controlled in sequencing batch reactors treating domestic wastewater [J]. *Water Sci Tech* 50 (10): 35—43
- Wang S Y, Gao D W, Peng Y Z, *et al*. 2004. Alternating shortcut nitrification/denitrification for nitrogen removal from soybean wastewater by SBR with real-time control [J]. *Journal of Environmental Sciences* 16 (3): 380—383
- 谢雄飞, 肖锦. 2000. 水体富营养化问题评述 [J]. *四川环境*, 19 (2): 22—25
- Xie X F, Xiao J. 2000. A review about eutrophication [J]. *Journal of Sichuan Environment* 19 (2): 22—25 (in Chinese)