

曝气生物滤池处理城市污水的中试研究

边喜龙¹, 鲍立新², 李建政²

1. 黑龙江建筑职业技术学院, 哈尔滨 150008

2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090

[摘要] 通过中试系统的运行,研究了表面水力负荷 q 、温度及气水比等工程控制参数对曝气生物滤池处理城市污水效果的影响。结果表明,温度对微生物的代谢水平具有显著影响,适宜的温度应控制在不小于 15°C 水平;在 20°C 的条件下,即便在 q 高达 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时,其出水的 SS, COD 和 NH_4^+-N 浓度也可分别保持在 15 mg/L , 60 mg/L , 18 mg/L 以下;在 q 为 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 20°C 的条件下,曝气生物滤池用于处理生活污水时,气水比控制为 3 是比较合理的。

[关键词] 曝气生物滤池;城市污水处理;中试;表面负荷;温度;气水比

[中图分类号] TQ939.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)11-0014-05

Municipal Wastewater Treatment by a Biological Aerated Filter in Pilot-scale

BIAN Xilong¹, BAO Lixin², LI Jianzheng²

1. Heilongjiang College of Construction, Harbin 150008, China

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

Abstract: Based on the performance of a pilot-scale system treating municipal wastewater, the influences of surface loading rate, temperature and the ratio of air to water on a Biological Aerated Filter (BAF) are investigated in this paper. The results show that the temperature of wastewater should keep above 15°C . When the surface loading rate reaches as high as $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ with the temperature of 20°C , the effluence concentration of SS, COD and NH_4^+-N could still keep below 15 mg/L , 60 mg/L and 18 mg/L , respectively. It is reasonable to adopt a ratio of air to water of 3.0 when the BAF is used to treat municipal wastewater.

Key Words: Biological Aerated Filter (BAF); municipal wastewater treatment; pilot-scale; surface loading rate; temperature; ratio of air to water

CLC Number: TQ939.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)11-0014-05

目前,我国城市污水处理率较低,专家认为,到2010年中国城市污水集中处理率只有60%。近年来城市污水处理技术快速发展。现代曝气生物滤池是在生物接触氧化工艺的基础上产生的一种好氧废水处理工艺,20世纪70年代末出现于欧洲,在经历了80年代中后期的较大发展后,90年代初已基本成熟^[1-2]。曝气生物滤池(Biological Aerated Filter, BAF)具有处理负荷

高、出水水质好、占地面积少等特点,应用范围不断扩大,在我国也得到了广泛重视,但仍然存在设计参数不确定、运行控制技术不够完善等不足^[3-7]。本文以北方某一居民小区的生活污水为处理对象,采用有效容积为 2.4 m^3 的中试反应设备,对影响曝气生物滤池处理效能的表面水力负荷 q 、温度、气水比进行了研究,以期曝气生物滤池的控制运行提供理论依据。

收稿日期:2007-04-15

基金项目:国家高新技术研究发展计划资助项目(2002AA601310)

作者简介:边喜龙,男,哈尔滨市南岗区十字街147号黑龙江建筑职业技术学院,副教授,研究方向为有机工业废水处理与资源化生物技术;E-mail: bianxilong@163.com

李建政(通讯作者),男,哈尔滨市南岗区海河路202号哈尔滨工业大学二区市政环境工程学院,教授,研究方向为有机工业废水处理与资源化生物技术;E-mail: ljz6677@163.com

1 试验装置与方法

1.1 实验装置

中试反应系统装置及工艺流程如图 1 所示。主体设备为圆柱形上向流曝气生物滤池,由不锈钢制成,高 4.5 m、内径 1.0 m,有效容积 2.4 m³;底部设有穿孔管,用于布水和反冲洗;底部另设布气穿孔管两套,一套用于曝气,另一套用于反冲洗时的布气。填料为膨胀黏土颗粒,球型,粒径 3~5 mm,不均匀系数 $K_{60}=1.8$,颗粒比重 1.56 kg/m³,堆积孔隙率 0.44;填装高度 3.0 m。填料层下部为承托层,承托层由重质瓷球组成,从上至下瓷球直径依次为 4 mm,8 mm,15 mm,30 mm,每层高度 100 mm。反应器壁上每间隔 30 cm 设有 1 个取水口,共 10 个,用于采取水样和测量水头损失。

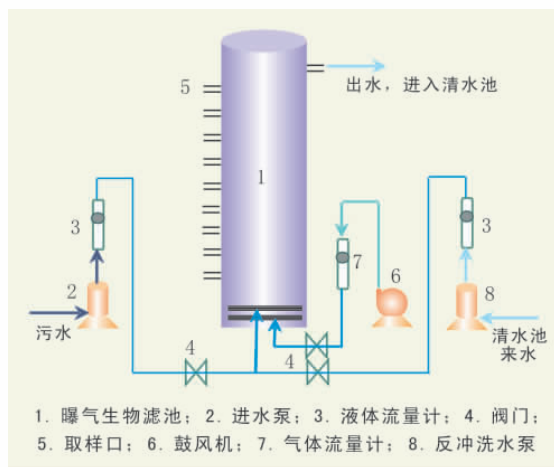


图 1 曝气生物滤池中试设备及流程图

Fig. 1 Schematic diagram of biological aerated filter process in pilot-scale

1.2 实验废水及其水质

中试设备安装在北方某城市小区的污水处理站,接纳的污水主要是该小区的生活污水及部分食堂废水,水质相对稳定。表 1 是对该污水处理站初沉池污水水质的检测结果。由表 1 可见,该污水水质化学耗氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) 浓度约为 350 mg/L,生化耗氧量 (Biochemical Oxygen Demand, BOD) 约为 160 mg/L,可生化系数为 0.45;悬浮物含量较少,氨氮浓度约为 34 mg/L,未检出 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N。

1.3 运行控制

反应设备以表面负荷 (q) 1.0 m³/(m²·h) 启动,并连续运行,未进行接种活性污泥,气水比控制在 2:1~4:1 范围。为考察不同水力负荷对曝气生物滤池处理效能的影响,设置了 1.0 m³/(m²·h), 2.0 m³/(m²·h), 3.0 m³/(m²·h) 和 4.0 m³/(m²·h) 4 个不同水力负荷条件,在每一水力负荷条件下连续运行 14 d。

曝气生物滤池是一种周期运行的水处理设施,随着曝气生物滤池的运行、悬浮物的逐渐积累,水头损失也逐渐增加。为了保证出水水质,必须定期进行冲洗。滤池冲洗周期根据水头损失确定,根据先期进行的实验结果(见表 2),本文以 1.4 m 水头损失为指标进行反冲洗周期的控制,冲洗操作顺序如下:① 气洗 5 min,关闭进水,以表面流速 25 m/h 通入空气;② 气水联合反冲洗 10 min,保持气速不变,以表面流速 20 m/h 通入清水;③ 清水漂洗,停止进气,保持水漂洗 10 min;④ 静沉 10 min。

1.4 分析项目及方法

中试设备运行过程中,每天检测的水质指标主要包括 COD_Cr , NH_4^+ -N, SS, pH 值和溶解氧 (DO) 等。其中,

表 1 实验废水水质

Table 1 Wastewater quality

COD_Cr /(mg·L ⁻¹)	溶解性 COD_Cr /(mg·L ⁻¹)	BOD_5 /(mg·L ⁻¹)	溶解性 BOD_5 /(mg·L ⁻¹)	NH_4^+ -N /(mg·L ⁻¹)	pH 值	SS /(mg·L ⁻¹)	T /°C
350±25	200±10	160±20	100±10	34±4.0	7.5±0.3	50±20	15±2

表 2 曝气生物滤池在不同表面水力负荷下的反冲洗周

Table 2 Filter runs of the biological aerated filter under different hydraulic surface loadings

表面水力负荷 /(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	水头损失 /m	运行周期 /h	出水 SS /(mg·L ⁻¹)
1	1.4	48	≤20
2	1.4	36	≤20
3	1.4	32	≤20
4	1.4	28	≤20

COD_Cr , NH_4^+ -N, SS 均依照美国水工业协会发布的标准方法^[8], pH 值采用 PHS-3C 型酸度计,溶解氧和温度采用 JBB607 溶解氧测定仪。

2 结果与讨论

2.1 表面水力负荷对 SS, COD, NH_4^+ -N 去除率的影响

表面水力负荷 q 是曝气生物滤池运行的重要参数,将直接影响 SS, COD, NH_4^+ -N 的去除率。中试系统装置先在水力负荷为 1.0 m³/(m²·h), 20℃ 及气水比为 3 的条件下启动并达到运行稳定(冲洗周期控制在 32~

36 h),并在温度和气水比保持不变的前提下,进一步考察了曝气生物滤池在 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $4.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 等不同水力负荷条件下,对 SS, COD, NH_4^+-N 的去除情况(见图 2)。

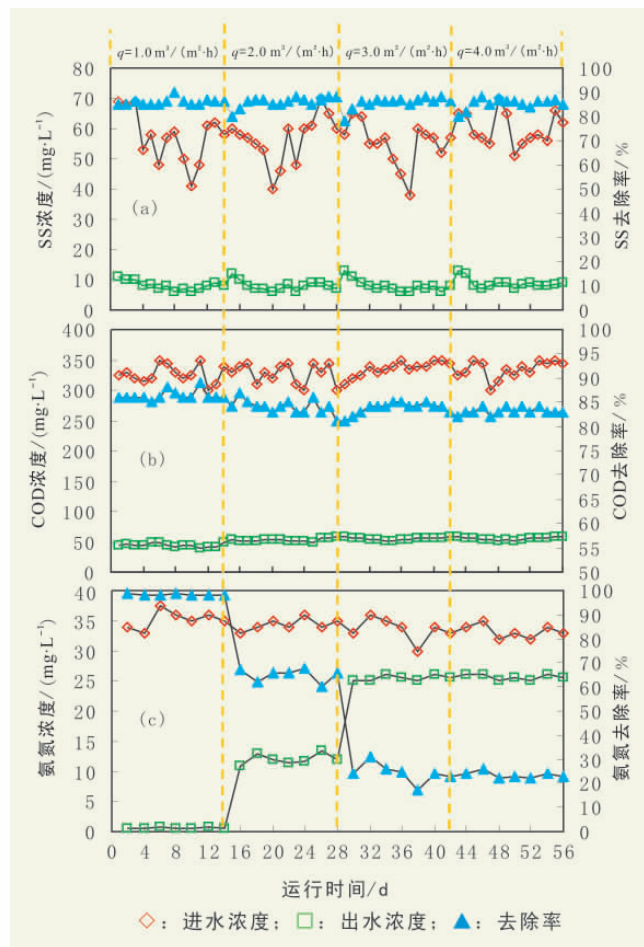


图 2 表面水力负荷对 SS, COD 和 NH_4^+-N 去除率的影响
Fig. 2 Effect of hydraulic surface loading on the removal of Suspend Solid (SS), Chemical Oxygen Demand (COD) and NH_4^+-N

从图 2 可以看出,中试曝气生物滤池对废水的 SS 和 COD 去除率均表现出一致的规律,即每一次 q 的提高,都会导致 SS 和 COD 去除率的暂时下降,但随着运行时间的延续,又会逐渐回升,并在 3~5 d 后达到稳定。就 SS(图 2(a))的去除来看,在 q 分别为 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $4.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 4 个不同水力负荷条件下达到运行稳定时,中试曝气生物滤池出水的 SS 浓度均稳定在 6.5 mg/L 左右,而 SS 去除率均稳定在 85% 左右。可见,在进水 SS 为 50 mg/L 的条件下,中试曝气生物滤池对 SS 的去除率十分稳定, q 的提高并未对 SS 的去除率造成影响。中试曝气生物滤池,通过生物膜填料的吸附和过滤作用,可以有效地去除废水中的 SS。

然而, q 的提高却对中试曝气生物滤池对 COD(图 2(b)) 和 NH_4^+-N (图 2(c)) 的去除产生了显著影响。在 q 分别为 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $4.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 4 个不同水力负荷条件下达到运行稳定时,中试曝气生物滤池对 COD 的去除率分别稳定在 92%, 91%, 90% 和 88% 左右,而对 NH_4^+-N 的去除率则分别稳定在 98%, 65%, 25% 和 22% 上下。可见, q 的提高,对中试曝气生物滤池对 NH_4^+-N 的去除影响,比对 COD 去除率的影响更为显著。

可生物降解的 COD 及 NH_4^+-N 是微生物生长繁殖必须的营养物质。分析认为,在中试曝气生物滤池运行的前期,即 q 为 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的运行期,填料表面的生物膜正处在生长阶段,大量微生物的繁殖,需要吸收和转化较多的 COD 和 NH_4^+-N 以构建细胞,此时表现出较高的 COD 和 NH_4^+-N 去除率(分别为 92% 和 98%)。随着 q 的提高,尽管单位时间内,进入反应系统的 COD 和 NH_4^+-N 总量增加,为生物膜的进一步增长提供了足够的营养条件,但在反冲洗的水力冲刷作用下,填料表面的生物膜厚度受到限制,即中试曝气生物滤池中的生物量达到了饱和,此时微生物吸收和代谢 COD 和 NH_4^+-N 的总量也就受到了限制。因此,中试曝气生物滤池对 COD 和 NH_4^+-N 去除率,表现出随着 q 的提高而下降这一变化规律。微生物生长过程中,对碳素的需求量比对氮素的需求量高出约 20 倍,当中试曝气生物滤池中的生物量增长受到限制时,其对氮素的需求量比对 COD 的需求量下降得更为显著^[9-10],这就是 q 的提高,造成中试曝气生物滤池对 NH_4^+-N 的去除率比对 COD 去除率下降更为显著的一个重要原因。硝化细菌可将 NH_4^+-N 氧化为 NO_3^--N ,属化能自养型细菌。在好氧活性污泥系统中,可生物降解的 COD 量的增加,将促进化能自养微生物的增长,从而抑制自养型硝化细菌的增长^[11]。这是中试曝气生物滤池对 NH_4^+-N 去除率随 q 的提高而呈现显著下降,而对 COD 去除率的影响并不明显的另一个原因。

中试曝气生物滤池,即便在 q 高达 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,其出水中的 SS, COD 和 NH_4^+-N 浓度也可分别保持在 15 mg/L , 60 mg/L , 18 mg/L 以下,完全达到了国家《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)中的一级标准。

2.2 温度对 COD 和氨氮去除率的影响

温度对微生物的代谢水平具有显著影响。在一定范围内,温度降低 10°C 可导致微生物代谢活性下降 1~2 倍。我国北方四季气温变化很大,而且昼夜温差大,掌握温度对曝气生物滤池运行效能的影响规律,对实际工程应用具有重要意义。本文在 q 为 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、气水比为 3 的条件下(冲洗周期控制在 32~36 h),考察了温度对中试曝气生物滤池处理城市污水的影响。

实验结果表明(图 3),水温在 20°C 和 15°C 时,对

COD 的去除率分别为 85.4% 和 82.7%，对 NH_4^+-N 的去除率分别为 63.2% 和 36.8%；当水温降低到 8℃ 时，COD 和 NH_4^+-N 的去除率分别仅为 74.2% 和 24%。可见，曝气生物滤池的处理效能受温度影响较大，适宜的温度应控制在不小于 15℃ 水平。

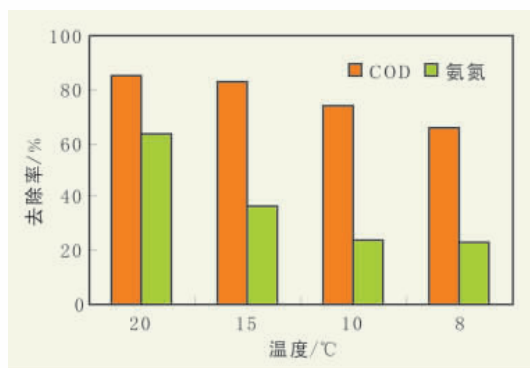


图3 温度对 COD 和氨氮去除率的影响

Fig. 3 Effect of temperature on the COD and NH_4^+-N removal

2.3 气水比对 COD 和氨氮去除率的影响

曝气生物滤池中的微生物类群，以好氧微生物为主，因此，足够的溶解氧(DO)是成功运行的关键因素之一。适宜的曝气强度，不仅可以为好氧微生物提供代谢所需氧气，同时也可以通过冲刷作用，促进填料表面生物膜的更新，对提高和维持曝气生物滤池的处理效果非常关键。实验结果表明(图4)，在 q 为 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，20℃ 的条件下(冲洗周期控制在 32~36 h)，气水比从 1 逐渐提高到 4 的过程中，中试曝气生物滤池出水的 DO 随之从 1 mg/L 上升到了 5.5 mg/L；当继续把气水比从 4 提高到 4.5 时，出水 DO 仅增加了 0.4 mg/L。在气水比从 1 提高到 2 的过程中，中试曝气生物滤池出水的 DO 从 1 mg/L 增至 2.1 mg/L，对 COD 和氨氮的去除率直线上升，分别从 60.1% 和 30.1% 提高到了 84.5% 和 40.2%；在气水比大于 2，即 $\text{DO} > 2.1 \text{ mg/L}$ 的范围内，COD 去除率不再随着气水比或溶解氧的提高而增加，而是表现出平稳的态势，维持在 84% 左右；而对 NH_4^+-N 的去除，直

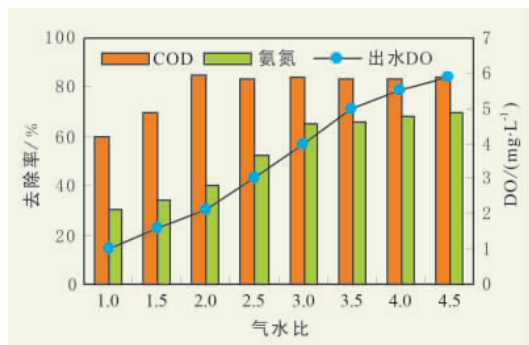


图4 气水比对 COD 和氨氮去除率的影响

Fig. 4 Effect of ratio of air to water on the COD and NH_4^+-N removal

到气水比达到 3，即溶解氧达到 4 mg/L 后才趋于缓和，保持在 65% 以上。可见在 q 为 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，20℃ 的条件下，中试曝气生物滤池适宜的气水比控制为 3 比较合理。

3 结论

通过上述试验结果分析，得出结论如下。

1) 表面水力负荷 q 是曝气生物滤池运行的重要参数，直接影响 SS、COD、 NH_4^+-N 的去除率。中试曝气生物滤池，在 20℃ 的条件下，即便在 q 高达 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时，其出水中的 SS、COD 和 NH_4^+-N 浓度也可分别保持在 15 mg/L、60 mg/L、18 mg/L 以下，完全达到了国家《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)中的一级标准。

2) 曝气生物滤池的处理效能受温度影响较大，适宜的温度应控制在不小于 15℃ 水平，温度对微生物的代谢水平具有显著影响。水温在 20℃ 和 15℃ 时，对 COD 的去除率分别为 85.4% 和 82.7%，对 NH_4^+-N 的去除率分别为 63.2% 和 36.8%；当水温降低到 8℃ 时，COD 和 NH_4^+-N 的去除率分别仅为 74.2% 和 24%。

3) 适宜的曝气强度对提高和维持曝气生物滤池的处理效果非常关键，在 q 为 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、20℃ 的条件下，曝气生物滤池用于处理生活污水时，适宜的气水比控制为 3 比较合理。

参考文献 (References)

- [1] 张薇, 史开武, 孔惠. 曝气生物滤池(BAF)的发展与现状[J]. 北京石油化工学院学报, 2005, 13(3): 24-30.
ZHANG Wei, SHI Kaiwu, KONG Hui. Present situation and development of Biological Aerated Filter (BAF) [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2005, 13(3): 24-30.
- [2] 徐亚明, 蒋彬. 曝气生物滤池的原理及工艺[J]. 工业水处理, 2002, 22(6): 1-5.
XU Yaming, JIANG Bin. Working principle and technology of biological aerated filter[J]. Industrial Water Treatment, 2002, 22(6): 1-5.
- [3] 张文艺, 夏绍凤, 翟建平, 等. 曝气生物滤池反应器的沿程生化特性研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(15): 71-74.
ZHANG Wenyi, XIA Shaofeng, ZHAI Jianping, et al. Study on biochemical characteristic along biological aerated filter reactor [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(15): 71-74.
- [4] 王立立, 刘焕彬, 胡勇有, 等. 填料层高度对曝气生物滤池工作性能的影响[J]. 中国沼气, 2002, 20(4): 11-16.
WANG Lili, LIU Huanbin, HU Yongyou, et al. The effect of bed material heights on the performance of biological aerated filter[J]. China Biogas, 2002, 20(4): 11-16.
- [5] 沈耀良. 曝气生物滤池工艺及运行控制 [J]. 水处理技术, 2005, 31(7): 7-10, 19.

- SHEN Yaoliang. Processes and operational control of biological aerated filter[J]. Technology of Water Treatment, 2005, 31(7): 7-10, 19.
- [6] 李亚新, 华玉妹. 生物曝气滤池处理生活污水工艺特性研究[J]. 给水排水, 2001, 27(9): 31-33.
- LI Yaxin, HUA Yumei. Study on BAF treatment of domestic wastewater [J]. Water & Wastewater, 2001, 27(9): 31-33.
- [7] 凌霄, 胡勇. 曝气生物滤池反冲洗关键因子的确定及机理浅析[J]. 给水排水, 2005, 31(10): 19-23.
- LING Xiao, HU Yongyou. Mechanism and key factor of combined air and water backwash for BAF [J]. Water & Wastewater, 2005, 31(10): 19-23.
- [8] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 19 edition. Washington DC, USA, 1995.
- [9] 蔡军, 安立超, 黄荣富, 等. 曝气生物滤池硝化脱氮的研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(12): 22-23, 42.
- CAI Jun, AN Lichao, HUANG Rongfu, *et al.* Biological aerated filter for removal of ammonia nitrogen [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(12): 22-23, 42.
- [10] 马军, 邱立平. 曝气生物滤池中的亚硝酸盐积累及其影响因素[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 84-90.
- MA Jun, QIU Liping. The nitrite accumulation in a Biological Aerobic Filter (BAF) and the influences factors [J]. Environmental Science, 2003, 24(1): 84-90.
- [11] 王海东, 王淑莹, 彭永臻. 进水负荷对硝化菌与异养菌竞争关系的影响[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 26-29.
- WANG Haidong, WANG Shuying, PENG Yongzhen. Influence of applied loading on competition between nitrifiers and heterotrophs[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(23): 26-29.

(责任编辑 王芷)

·封面文字说明·

云南屏边发现大面积国家一级重点保护植物桫欏

近期, 在我国植物多样性最集中的云南省红河哈尼族彝族自治州屏边县的大围山自然保护区, 科学家发现了大面积的国家一级重点保护植物桫欏。其中一株多头桫欏树树龄达上千年之久, 其主干直径近 5.2 m, 茎头达 150 多个, 树干需数人方能合围, 号称“桫欏树王”。

桫欏 (*Cyathea Spmulusa*) 又称树蕨、蕨树、水桫欏、刺桫欏、大贯众、龙骨风、七叶树, 是与恐龙同时代的古老孑遗植物中蕨类植物的代表。在 2 亿年前的恐龙时代, 桫欏曾遍及地球, 高大巍峨而繁茂, 是草食性恐龙的主要食物, 后因地质变迁而多数被深埋地下变成煤炭, 只有极少数幸存, 因而极其珍贵, 有“活化石”之称。

桫欏树形奇特, 其树干呈圆形, 高可达 3~8 m, 茎顶簇生几轮大型三回羽状复叶, 树叶似孔雀尾巴散开, 每片复叶长 2~3 m, 羽片呈矩圆形, 小羽叶长 30~50 cm。其根细长, 无主根, 树上不分树。有疏刺或布满六角形的斑纹, 中部以上有明显的变形叶痕交错排列, 呈深褐色或浅黑色, 外面坚硬, 且有老叶脱后的痕迹。桫欏长长的羽状复叶向四周伸展, 远看像一把大伞撑在地面。

桫欏是孢子植物, 不产种子, 靠藏在叶片背面的孢子繁衍后代。蕨类植物的孢子与常见的植物种子很不相同, 常见植物的



种子落在适宜的土壤上就能生根发芽, 长成新的植株, 而蕨类植物的孢子落入土壤之后, 先要萌发长成一个心形的片状体, 称为原叶体。原叶体色绿, 下面生着假根, 能独立生活。通常, 原叶体上长着颈卵器和精子器, 精子器里的精子成熟之后, 可以依靠自身的鞭毛在水中游动, 并可以游到颈卵器里, 与卵细胞结合成合子, 合子仍然不断地吸收原叶体上的养料, 继续发育而成为一棵新的蕨类植物。

桫欏的祖先是 3.8 亿年前古生代志留纪和下泥盆纪昌盛一时的裸蕨植物, 在距

今约 1.8 亿年前的中生代侏罗纪时期遍布全球。由于茎叶中含有大量的淀粉, 桫欏成了同时期生长的草食性恐龙等大型动物的重要食物。在一定程度上, 桫欏这一植物家族造就了地球生命史上辉煌的恐龙时代, 因此又被称为“恐龙树”。桫欏特别喜水怕冷, 但是到了白垩纪, 由于气候逐渐变得干燥、寒冷, 生物进入了新的灭绝周期, 桫欏这种曾在地球上盛极一时的植物也难逃厄运, 现在仅幸存于尚保存着古代气候特征的少数低纬度的热带、亚热带地区。

在距离大桫欏树 10 km 左右的大围山自然保护区的边缘地带, 科学家又发现了集中连片的桫欏树群。这些树群分布疏密有致, 共计 3 600 多株。另外, 科学家还曾在我国的福建、广东、海南、广西、贵州、四川、西藏、台湾等地发现过大片的桫欏树群。

由于主要生长在亚热带、热带气候条件下的山地林下和溪边阴湿地带, 而且各地数量都不多, 并呈零星状分布, 桫欏已经成为研究植物形成、植物地理学及地球历史变迁的好材料, 具有重要的保护价值和科学研究价值。

本期封面图片为游人围抱在云南发现的千年多头桫欏王时的情景, 由新华社供稿。

(本刊记者 冯峰)