

统一的活性污泥丝状菌型膨胀理论

王 凯 军

(北京市环境保护科学研究所, 北京 100037)

摘要 在总结分析各种污泥膨胀问题理论和假说的基础上, 提出了统一的丝状菌膨胀理论。所提出的理论可以很好地解释目前常见的大部分膨胀现象。根据此理论可以很好地指导高、低负荷污泥膨胀的控制和防治。笔者在实验中采用曝气池首端强制曝气的阶段曝气措施, 有效控制污泥膨胀, 使污泥指数 (SVI) 从 300ml/g 降到 100ml/g 以下。

关键词 污泥膨胀, 丝状菌, 活性污泥, 数学模型

自然界至少存在 30 种不同的可以引起污泥膨胀的丝状菌^[1], 目前有关污泥膨胀的理论和假说较简单, 仅能解释少数几种膨胀现象^[2]。污泥膨胀现象与微生物, 特别是丝状菌 (filamentous) 的生理活动有关。根据丝状微生物对环境条件和基质的不同要求, 将膨胀分为 5 种基本类型, 即低基质浓度型, 低 DO 浓度型, 营养缺乏型 (NP)、高硫化物和 pH 不平衡型^[3]。这 5 种类型的膨胀占现有膨胀的绝大部分。通过对以上几种膨胀问题的分析, 本文建立了丝状菌竞争选择动力学理论, 说明了统一的活性污泥丝状菌膨胀理论。

1 污泥膨胀的假说

1.1 表面积/容积比 (A/V) 假说^[2]

假说中所指的表面积和容积, 是指活性污泥中微生物的表面积与体积。假说认为伸展于絮凝体之外的丝状菌的比表面积 (A/V) 要大大超过菌胶团细菌的比表面积。当微生物处于受基质限制和控制的状态时, 比表面积大的丝状菌在取得底物方面要比菌胶团菌有利。结果在曝气池内丝状菌变成优势菌, 与此相反菌胶团细菌就变为劣势菌。这一假说对于解释低基质浓度, N 和 P 元素缺乏型的污泥膨胀是有效的。但其只是定性的假说, 缺乏定量数据的支持。

1.2 累积-再生假说 (AC-SC)^[2]

A/V 假说无法解释高负荷下的污泥膨胀现象, Chudoba 认为存在另一种影响丝状菌和菌胶团菌选择生长的因素^[4]。提出了 AC-SC 假说, 该假说可用图 1 表示。

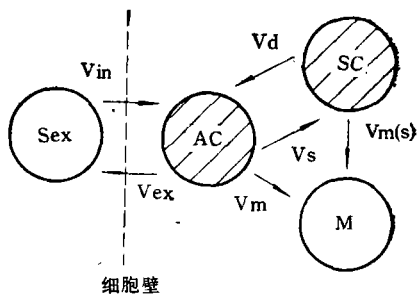


图 1 污泥膨胀 AC-SC 假说

S_{ex} 为细胞外基质浓度 V_{in} 、 V_{ex} 为基质输入、输出细胞速率 V_d 、 V_s 为贮存物解聚、形成速率 V_m 为基质代谢速率 $V_{m(s)}$ 为贮存物质代谢速率 M 为代谢产物

微生物对基质的利用分为细胞内累积、贮存和代谢三个过程。基质通过传输、扩散作用进入细胞体内成为累积物质。细胞进行复制之前, 单位重量细胞能够累积基质的量称为细胞的累积能力 (Accumulation Capacity, AC)。累积物质在细胞内进一步转化为贮存物。同样单位重量的细胞贮存基质的量称为细胞的贮存能力 (Storage Capacity, SC)。在活性污泥工

艺中,污水从曝气池到沉淀池的这一循环中,仅当被微生物积累的有机物得到氧化,积累能力得到恢复,微生物才能继续进行生长和代谢,这种微生物才能在污水处理中起作用。不同的微生物的 AC 值是不同的,在混合培养中的优势种群是具有最高 AC 值的种群。Grau 等人的研究表明,丝状菌的 AC 值通常小于菌胶团菌的 AC 值^[5]。如果微生物摄取的营养物得不到降解,则微生物实际的 AC 值会降低,这也就是 AC-SC 假说对高负荷下污泥膨胀的解释。

1.3 选择性准则^[4]

Chudoba 等人(1974)提出活性污泥的动力学选择性准则。理论基于不同种属的微生物的生长动力学参数不相同的,动力学参数按照 Monod 方程的形式:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (1)$$

式中, μ 和 $\mu_{\max}$ 分别是实际和最大比生长速率 (T^{-1}), K_s 为饱和常数 (mg/L), S 为限制性基质浓度 (mg/L)。

按照 Chudoba 提出的理论,具有低 K_s 和 $\mu_{\max}$ 值的丝状菌,在低基质浓度条件下将具有较高的生长速率,从而占有竞争优势。而在高基质浓度下,情况恰好相反(图 2)。

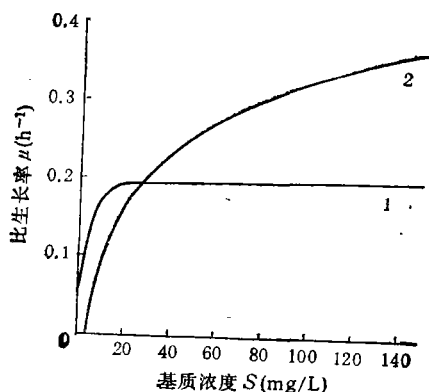


图 2 混合培养微生物选择性竞争

1. 丝状菌 $K_s = 1 \text{ mg/L}$ $\mu = 0.2 (1/h)$ 2. 菌胶团菌
 $K_s = 50 \text{ mg/L}$ $\mu = 0.5 (1/h)$

Chudoba 对以下 11 种基质: 葡萄糖、半乳糖、乙酸、戊酸、柠檬酸、谷氨酸、丙氨酸、酪氨

酸、甲醇、乙醇和苯酚进行实验验证。除半乳糖外,所有的被测基质都符合选择性理论,该理论很好地解释了完全混合曝气池膨胀的原因,并由此开发了选择器控制膨胀的新途径。

1.4 饥饿理论假说^[5]

考虑到污水中不可降解基质和微生物衰减系数的影响。Chiesa 等人将不同研究者对动力学的研究进行汇总,将活性污泥中的微生物分为 3 种不同类型。第一类是快速生长的菌胶团细菌;第二类为具有高的基质亲和力、生长缓慢的耐饥饿丝状菌(低 K_s 值);第三类对溶解氧有高亲和力,对饥饿高度敏感的快速生长的丝状菌。见图 3。

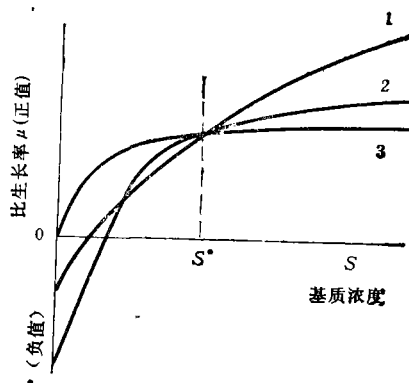


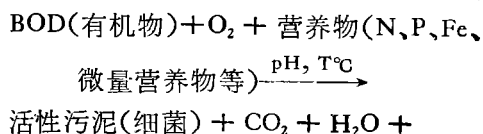
图 3 包含衰减常数的微生物生长与竞争关系

1. 菌胶团细菌 2. 快速生长丝状菌 3. 生长缓慢丝状菌

在低的基质浓度下,第二类菌将占优势,当浓度在 S^* 以上,只要氧的传递不是限制性因素,非丝状菌(第一类)将占优势。在高基质浓度且溶解氧限制的情况下,第三类菌将增殖,影响污泥沉淀性能。

2 统一的丝状菌膨胀理论

Chudoba 的选择性准则仅在碳源基质条件下得到了实验验证, Palm 证实对于溶解氧上述准则也是适用的^[6]。事实上,对于混合培养的活性污泥的体系,微生物的生长可以被多种物质限制,可将综合反应式写成如下形式:



+残余有机物 (2)

BOD, DO 和 N、P 以及各种营养物都有可能成为控制丝状菌和菌胶团细菌生长的限制性因素。另外,环境因子如 pH、温度等也会对丝状菌的生长有影响。因此微生物之间的竞争应遵循广义的 Monod 方程,即:

$$\mu_i = \mu_{\max i} \left(\frac{S_1}{K_{i1} + S_1} \cdot \frac{S_2}{K_{i2} + S_2} \cdots \frac{S_n}{K_{in} + S_n} \right) \quad (3)$$

其中, $i = 1, 2$ 分别为丝状菌和菌胶团细菌。

上式为微生物受 n 种不同基质限制的一般情况,利用上述方程可以很好地解释前面所列举的 5 种基本的丝状菌型的膨胀。由于 N、P 元素在城市污水中是平衡的。因此,一般只需考虑碳源和 DO 两种基质限制的情况。则(3)式可写成如下的双基质限制方程。

$$\mu_i = \mu_{\max i} \frac{S_1}{K_{i1} + S_1} \cdot \frac{S_2}{K_{i2} + S_2} \quad (4)$$

通过实验可获得上述方程的各参数值,对于城市污水经厌氧预处理后测定的参数值^[2]见表 1。

表 1 数学模型参数值

参 数	菌胶团细菌	丝 状 菌
$\mu_{\max}(\text{d}^{-1})$	4.4	3.0
$K_s(\text{mg/L})$	64	40
$K_i(\text{mg/L})$	0.1	0.027
$Y(\text{mg/mg})$	0.153	0.139
$K_d(\text{d}^{-1})$	0.012	0.01

Y 为产率系数

在对上述方程的研究中,根据负荷的不同可分为 3 种不同的情况:

(1) 低负荷(负荷小于 $0.15 \text{ kgBOD}/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$) 由于溶解氧的供给一般是充分的,方程变为单一基质限制的情况。

(2) 高负荷(负荷大于 $0.4 \text{ kgBOD}/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$) 由于负荷较高,主体溶液中的基质浓度高、耗氧快,氧成为限制性因素,方程变为溶解氧单一基质限制的情况。这时如果供

氧不充分,丝状菌将大量繁殖而形成膨胀。

(3) 中等负荷 ($0.15-0.40 \text{ kgBOD}/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$) 在这一负荷阶段,丝状菌和菌胶团细菌的平衡处于很不稳定状态。基质的类型、供氧方式和反应器的形状等都对两类菌的生长有影响。污泥的沉降性能取决于实际的运行条件,特别是曝气池中实际的基质浓度和 DO 浓度有关。

以上结果可用图 4 表示,在高、低负荷下都可以观察到丝状菌大量增殖的情况,这就是在高、低负荷范围污泥膨胀的原因,解释了长期困惑人们的一个难题。值得注意的是图 4 的结果是在一定供氧条件下的结果。如果供氧条件发生变化,则丝状菌与菌胶团菌的平衡将会发生变化。也就是说导致污泥膨胀的负荷界限将会有所变化。这也就是长期以来众多研究者们对于负荷对污泥膨胀关系的报道差异很大的原因之一。

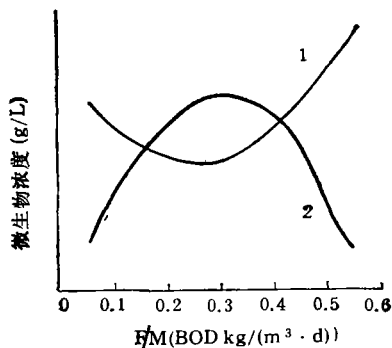


图 4 负荷与两类微生物竞争生长的关系

1.丝状菌 2.菌胶团菌

3 污泥膨胀的控制

3.1 丝状菌的重要作用

污泥膨胀早期的控制方法主要是靠外部投药直接杀死丝状菌或投放无机和有机混凝剂以增加污泥絮体的比重,这一类方法由于没有解决污泥膨胀发生的原因,因此无法彻底解决污泥膨胀问题。

事实上,污水生物处理是一种利用混合培养的微生物去除混合基质的过程,这是一种接

近于自然净化的过程。在其中菌胶团细菌和丝状菌形成一个微生物的生态体系,存在着两类微生物之间在时间和空间上的动态生态学的相互作用。一般认为活性污泥中的混合体系是靠原始协同,互相扶助的共生关系来维持稳定状态。在这种共生关系中,丝状菌是不可缺少的一类重要微生物。在活性污泥工艺中对高效、稳定地净化污水起着重要的作用,简单讲有以下几个重要作用。

(1) 保持污泥絮体结构,形成沉淀性能良好的污泥。根据活性污泥絮体形成理论可知,丝状菌是形成污泥絮体的骨架,并对于保证污泥絮体的强度有很大作用^[3]。如缺少丝状菌则污泥絮体强度降低,抗剪切能力差,在曝气池中往往会造成混浊的出水。

(2) 保持高的净化效率,低的出水浓度。按照 Monod 方程可得到处于稳态条件下的最小基质浓度(S_{min})的表达式:

$$S_{min} = K_d \cdot K_s / (Y \mu_{max} - K_d) \quad (5)$$

在丝状菌与菌胶团细菌共生的系统中,由于丝状菌具有较低的 K_s 和 μ_{max} 数值,则其 S_{min} 值较小,因而丝状菌的存在可以保证获得高质量低浓度的出水水质,从而保证净化效率。

(3) 保持低的出水悬浮物。从大量的运转资料看,活性污泥中丝状菌的数量太高、太低,都不适宜于实际污水厂的运转。前者虽然出水清澈,但是污泥沉降性能差,而后者沉降性能好,但出水往往含有较多细小悬浮物。适宜数量的丝状菌形成的污泥絮体网状结构在沉淀过程中能对上升的水流起到过滤作用,并吸附截留水中细小颗粒物和游离细菌,又可保持良好的沉淀性能,从而产生良好的出水水质。

3.2 环境调控和代谢机制调控控制方法

通过对于污泥膨胀机理的深入研究和对丝状菌作用的进一步了解,对于污泥膨胀的控制方法也从简单地杀死丝状菌发展到应用生态学原理调节工艺运行条件和反应器内的环境条件,造成菌胶团菌和丝状菌协调共生的环境,从而从根本上消除引起污泥膨胀的因素,达到控制污泥膨胀的目的。这类控制方法分为两种。

(1) 环境调控控制法 环境调控技术的出发点是通过对曝气池中生态环境的改变,造成有利于菌胶团细菌生长的环境,应用生物竞争的机制抑制丝状菌的过度生长,从而达到控制污泥膨胀的目的。根据不同的理论、人们发展了不同的调控技术,最有代表性的是好氧选择器和序批式活性污泥工艺等,这一类方法是利用基质浓度在空间和时间上的变化,选择性的控制丝状菌的生长。

(2) 代谢机理调控控制法 这一类方法的出发点是利用两类菌不同的代谢机制,造成有利于菌胶团菌生长代谢的条件,方法有缺氧、厌氧选择器和污泥再生工艺等。目前的研究已证明菌胶团细菌在缺氧、厌氧条件下,有比丝状菌高两个数量级的基质利用率和硝酸盐还原速率。这样在缺氧和厌氧条件下,菌胶团菌利用不同的氧代谢途径(利用硝酸盐中的化合态氮来降解有机物),而丝状菌由于缺乏这种能力,生长受到抑制。

值得说明的是对于同一种膨胀问题,由于对膨胀原因解释不同,不同的控制措施都可有效的控制膨胀的发生。例如,对于高负荷型的膨胀问题,按照 AC/SC 理论可选用再生型反应器。而采用统一的动力学理论则是发生了溶解氧的限制,可采用曝气池强制曝气的方式控制。

以上的调控方法是将丝状菌控制在一个合理的范围之内,而不是杀死丝状菌,这一概念的应用是人们在污泥控制技术和实践上的一大进步。

3.3 污泥膨胀控制实例

笔者在采用活性污泥工艺处理城市污水厌氧预处理出水时,在中、小试研究中都曾遇到污泥膨胀问题,严重时在一个星期内污泥的 SVI 值可高达 1000ml/g(图 5)。在研究中曾采用向曝气池投加厌氧污泥、快速搅拌回流污泥、改变曝气池流态和厌氧出水预曝气等在其他实验中行之有效的控制方法(图 5)。但始终没有解决污泥膨胀问题。虽然,最后采用曝气池首端加填料的方法,可以有效地控制污泥膨胀。但

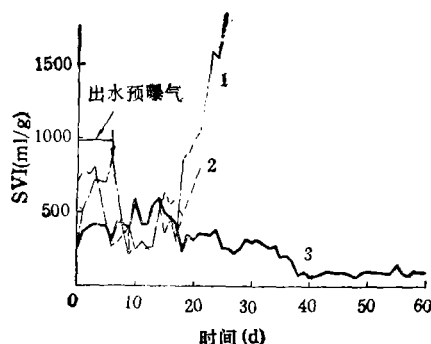


图5 厌氧出水的SVI和膨胀控制

1.一次性投加厌氧污泥和预曝气 2.连续投加厌氧污泥 3.加填料

增加填料会增加造价,并且填料的维修造成管理不便。通过进一步的分析发现,曝气池中的负荷虽然不高($0.2\text{kgBOD}/(\text{kgMLSS})$),由于厌氧出水易于生物降解,特别是初期的耗氧速率快。结果造成曝气池首端严重缺氧($\text{DO} = 0\text{mg/L}$),从而造成了有利于丝状菌生长的条件,形成了膨胀。针对这种情况,在实验中采用了曝气池首端强制曝气的阶段曝气措施,从而可以有效地控制污泥膨胀的发生(图6)。由此

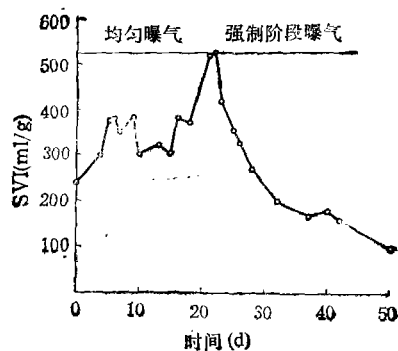


图6 强制曝气的阶段曝气法控制膨胀

看出,污泥膨胀的发生不但与负荷、池型等宏观条件有关,更重要的是曝气池中实际的基质浓度和溶解氧浓度等微观条件。

4 结论

(1) 活性污泥是菌胶团细菌与丝状菌的共

生系统。因此,任何活性污泥系统中都存在着丝状菌。在丝状菌与菌胶团细菌平衡生长时,不会产生膨胀问题,只有当丝状菌生长速率超过菌胶团菌时才会出现膨胀问题。

(2) 由于活性污泥中存在着至少 30 种丝状菌,因此,污泥膨胀类型众多、原因复杂。但将其概括为下列 5 种类型的膨胀,即低基质浓度型、低溶解氧型、高 H_2S 、营养缺乏型(N P)和高、低 pH 值引起的膨胀,可以包括绝大部分的膨胀类型,这在一定程度上方便了问题的研究。

(3) 以上的 5 种类型的污泥膨胀均可以用广义的 Monod 方程解释其膨胀原因,据此提出的统一的污泥膨胀理论可以用来指导污泥膨胀的研究和控制。

(4) 就活性污泥膨胀的原因看,基质浓度、溶解氧对污泥膨胀的影响是从宏观的运转条件考虑,但曝气池首端的实际的基质和溶解氧浓度是更为重要的微观因素。种群的动态是由微环境中的营养物的状况所确定的。

(5) 污泥膨胀是由丝状菌和菌胶团菌的理化性质所确定,具体讲丝状菌具有高的基质、DO 亲和力,低的最大比生长率、内源代谢率、硝酸盐还原能力等。同时丝状菌的生长还受下列环境因素的影响;污水成分,基质和溶解氧浓度,工艺过程参数(污泥龄、负荷)和进水方式等。只要合理地选择设计参数,使环境条件不利于丝状菌的生长,即可控制丝状菌的过度生长而造成的膨胀问题。

参 考 文 献

- 1 Eikelboom D H. *Water Research*. 1975, 9(6):365
- 2 田口 广,孙王修译. 活性污泥膨胀与控制对策. 北京: 中国建筑工业出版社,1982: 21,33
- 3 王凯军. 活性污泥膨胀的机理与控制, 北京: 中国环境科学出版社,1992: 64,83
- 4 Chudoba J et al. *Water Research*. 1974, 8(6): 475
- 5 Chiesa S C et al. *Water Research*. 1985, 19(4): 401
- 6 Palm J C et al. *J. WPCF*. 1980, 52(10): 2484

ween the properties of the two kinds of immobilized microbial beads. It was observed that the beads made from PVA have higher stability and strength than those made from sodium alginate, and are more suitable for wastewater treatment. However, their mass diffusivity should be improved.

Key words: entrapping agent, immobilized microbe beads sodium alginate, PVA.

Studies on Treatment Techniques of Wastewater from Organo-phosphorus Pesticide Production. Luo Qifang, Zhang Xiaohu et al. (Institute of Environmental Medicine, Tongji Medical University, Wuhan 430030): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 32—34

Treatment techniques of wastewater from production of organo-phosphorus pesticides with cyclic structure such as Methyl-ISP etc. were studied. Results show that removal rates of COD_{cr} and organo-phosphorus were 59.6% and 91.3%, respectively, and the ratio of $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{cr}}$ could be increased from 0.12 to 0.46 by wet oxidation method when operating pressure was 0.5—0.6 MPa (150—160°C), PH value was 2, and HRT is 1h. Removal rate of respective COD_{cr} was 76.0% and 82.1% for activated sludge aeration and biological activated carbon process when the diluted mixing wastewater is disposed directly under selected conditions. If the diluted mixing wastewater is disposed by biological processes after wet oxidation, removal rate of COD_{cr} could be increased by about 10% under the same conditions.

Key words: wastewater, organo-phosphorus pesticides, wet oxidation, biological treatment.

Drawing Water to Control Ground Water Pollution from Cr^{6+} . Fu Jinsheng et al. (Anyang Environment Protection Monitoring Station, Anyang 455000): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 35—38

Taking the environmental hydrological and geological conditions of an Cr^{6+} polluted urban industrial area into account, A countermeasure, i.e. drawing water from underground in the center of

the area to cut off underground streams, was taken to reduce the level of pollution of ground water from Cr^{6+} . After 6 years practice, the polluted area was reduced from 0.321km² to 0.032km² and the drinking water supply was back to normal.

Key words: ground water pollution, chromium pollution.

Design Methods for Constructed Wetlands—A New Wastewater Treatment Process. Zhu Huichang et al. (Shanghai Light Industry Design Institute, Shanghai 200031) *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 39—43

The constructed wetland is a new wastewater treatment process. Based on the flow status, the constructed wetlands can be divided into surface flow system and subsurface flow system. Basically, the wetlands are plug flow reactor using common reeds or other plant for oxygen transfer. The BOD and SS removal rates can be as high as 85%—95% and about 90%, respectively. The $\text{NH}_3\text{-N}$ and P removal rates can reach about 40%—50%. However, the costs for the construction and operation of the constructed wetlands are 0.1—0.5 of the conventional secondary wastewater treatment processes. The design methods for constructed wetlands are introduced in this paper.

Key words: constructed wetland, surface, flow, subsurface flow.

A Unified Hypothesis for Filamentous Bulking in Activated Sludge Processes. Wang Kaijun (Beijing municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 44—48

Based on the analysis and synthesis of various existing theory and hypothesis for activated sludge bulking, a unified theory for the phenomena was proposed. The theory can satisfactorily explain most of the common bulking phenomena, and hence can be utilized in the control and prevention of sludge bulking. Experiment results show that under the guidance of the theory the SVI of slud-

ge can be reduced from over 300 ml/g to below 100ml/g.

Key words: filamentous, activated sludge, sludge bulking control.

Exchange of Greenhouse Gasses between Agroecosystem and Atmosphere. Wang Jingguo (College of Agricultural Resources and Environmental Science Beijing Agricultural University, Beijing 100094): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 49—53

Flux of greenhouse gasses in agricultural ecosystem contributes significantly to global greenhouse effect. Major greenhouse gasses, CH₄, CO₂ and N₂O, are directly or indirectly related to farming system and agricultural practice. Destruction of natural vegetation, increase in rice plantation and crease the emission of CH₄, CO₂ and N₂O from the system, but reduce the soil uptake of CH₄ as well. The processes in soil, involving production of greenhouse gasses, were also discussed.

Key words: greenhouse gasses, carbon dioxide, methane, nitrous oxide, soil plant, agroecosystem.

Progress of Atmospheric Environmental Impact Assessment in China. Ning Datong, Zhong Liangxi et al. (Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 54—57

In the past two decades, as the focus of atmospheric environmental protection gradually shifted from controlling smoke and dust pollution resulted from point sources to the regional comprehensive prevention and treatment the atmospheric environmental impact assessment achieved remarkable progress in such aspects as scope of assessment, requirements and contents, research procedure, experimental methods, transportation and diffusion models for air pollutants, and their relation with control of total pollutant amount and regional atmospheric environmental planning. Based on the results of more than 2000 completed projects, a

general review and summary of the features and main contents of the research work in each step of the development of atmospheric environmental impact assessment in China during the past 20 years were presented in this paper. 6 key problems needing intensive study were proposed and possible progress in the field in the near future was predicted.

Key words: air pollution, modelling, environmental impact assessment.

Evaluation of Active Indicator of Activated Sludge. Xu Xiaolu, Shun Xiuying (Zhejiang Normal University, Jinhua 321004): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 58—62

This paper evaluates the validity of parameters such as oxygen uptake rates (OUR), ATP content, dehydrogenase activity, nucleic acids and protein content, amino acids, oxidatice enzyme, hydrolytic enzyme, volatile suspended solids as indicators of the activity of activated sludge. Results show that dehydrogenase activity, OUR, ATP are the most suitable controlling parameters of activated sludge.

Key words: activated sludge, activity indicator, dehydrogenase activity, ATP, OUR.

Removal of Nitrate from Drinking Water. Liu Linghua (Water Quality Research Center of Water Conservancy, Beijing 100044): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 63—66

This paper discusses the methods for the removal of nitrate from drinking water, and their advantages and disadvantages. Analysis and comparison show that both ion exchange and dinitrification can be used in the production of drinking water in large scale. However, denitrification is even more promising and is currently under comprehensive study. The process turns nitrate into nitrogen, with no waste water produced. The cost of the method is low. But, heterotrophic denitrification needs further complicated treatment to remove extra amount of organic compounds and autotro-