小麦-玉米轮作期土壤排放 N_2O 通量及总量估算*

曾江海 王智平 张玉铭
(中国科学院石家庄农业现代化研究所,石家庄 050021)

宋文质 王少彬 苏维瀚
(中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘要 对小麦-玉米轮作期周年的 N_2O 通量进行了测定和总量估算,分析了 N_2O 通量与土壤湿度、地温、气温、降水和施氮量的关系。由实验获知,华北平原栾城农业生态系统实验站的农田 N_2O 通量(N)为 10.6—24.2μg/(m^2·h),相应的全年排放总量(N)为 0.93—2.11kg(hm^2·a)。施用尿素的农田排放 N_2O 量约占化肥施用量的 0.54%,施用有机肥和化肥的农田排放 N_2O 量占总施氮量的 0.70%。

关键词 氧化亚氮,排放总量,小麦-玉米轮作,土壤。

氧化亚氮(N_2O)是大气中主要温室气体之一,其浓度已从工业革命前的 288×10^{-9} 上升到目前的 310×10^{-9},每年约以 0.8×10^{-9} 的速度增长[1],年增长率约为 0.2%—0.25%[2,3]。N_2O 的平均寿命约为 150a,在过去 100 年间对温室效应的贡献约为 5%[3]。

N_2O 具有多种排放源,如化石燃料及生物质燃料燃烧,土壤生物化学过程,土地利用的改变及其它农事活动等。其中,土壤生物过程,土地利用及农事活动是它的主要排放源,占总排放量的 80%左右[4]。在农事活动中由于施用氮肥引起的 N_2O 排放量变化甚大,据估计约占氮肥施用量的 0.5%—7%[5—7]。本文通过大量实验,研究了我国华北典型农田释放 N_2O 的部分规律,并初步得出了氮肥排放 N_2O 的比例。

1 材料和方法

1.1 土地条件和实验设计

本实验设在中国科学院栾城农业生态系统试验站(河北省石家庄市郊栾城县城东,37°53′N,114°41′E)的施肥制长期定位试验地。作物耕种方式为小麦-玉米轮作制。农田土壤有机质含量 12—13g/kg,全氮量 0.78g/kg,碱解氮 58—60mg/kg,速效磷(P_2O_5)20mg/kg,速效钾(K_2O)100—120mg/kg,pH8.5,容量 1.402g/cm^3。

N_2O 测定选用 3 种施肥处理的农田区:①无肥区(对照);②化肥 NPK 区,每季作物施氮量(尿素 UR-N)150kg/hm^2,全年 300kg/hm^2;③有机-无机肥区,有机肥折氮为 7.7kg/hm^2,化肥氮(UR-N)300kg/hm^2。整个试验观察期自 1992-09-25—1993-09-21,共测定 69 次,平均每 5d 观测 1 次,全年中,施肥或浇水后平均每 3d 观次 1 次。

1.2 采样方法

气样用 1×1×1m^3 的密闭罩,下部开口埋入地下 5—10cm,罩壁为杜邦公司生产的聚四氟乙烯薄膜,侧面立柱中央留有采样孔,上部用微型风扇扰动鼓风,使气样混合均匀。采样用微型气泵抽气送入采气袋(化工部大连光明化工研究所生产的镀铝薄膜软袋,体积 1L)。采样时记录气温、地温,并采集 0—20cm 土壤样品(5 点混合样)测定土壤 NO_3^--N,NH_4^+-N 含量及土壤含水量。

1.3 分析测定方法

气样分析使用北京分析仪器厂生产的 SP-3410 型气相色谱仪,配备有^{63}Ni 源电子捕获检测器,工作温度 320℃,发射计量 8mCi,玻璃色谱柱长 4m,内径 4mm,填充 50—80 目 Porapack Q,柱温 70℃,进样量 2ml,以经 5Å 分子筛、硅胶、脱

* 国家"八五"科技攻关项目
收稿日期:1994-05-15

氧剂净化后的高纯氮(99.999%)为载气,流速25ml/min。标准气由美国 Athesen 气体生产公司出品,浓度为 0.94×10^{-6},用空气稀释后使用,分析误差±1%。

土壤样品中 NO_3^--N 用酚二磺酸比色法,NH_4^+-N 用靛粉蓝比色法测定,土壤含水量用烘干法,地温用本站气象场(距试验观测点 100m 处)的地下 5cm、10cm、20cm 地温资料和地上百叶箱的气温资料。

1.4 计算方法

在单位时间(h),单位面积(m^2)上由农田向大气释放的 N_2O 通量(F)值,是多种因素综和作用的结果,可以表示为

$$F[\mu g/(m^2\cdot h)] = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \qquad (1)$$

其中,m_1,m_2(μg)为在时间 t_1,t_2时间内体积 V(m^3)下 N_2O 的质量,A(m^2)为采样罩面积。

$$m_1 = \rho V c_1 \qquad m_2 = \rho V c_2 \qquad (2)$$

其中,ρ(μg/m^3为 N_2O 质量密度,c_1,c_2(10^{-9})为 N_2O 在 t_1,t_2时间内的体积混合比。所以

$$F[\mu g/(m^2\cdot h)] = \rho H \frac{c_2 - c_1}{t_2 - t_1} \qquad (3)$$

经换算,$H=V/A$,是采样罩的高度。因而,测得 t_1,t_2时间的 N_2O 混合比 c_1、c_2和采样罩高度,就可以求得 N_2O 通量。

2 结果和讨论

2.1 不同施肥处理区的 N_2O 通量变化

图1给出了 N_2O 通量和一些环境因素的年变化趋势。由图1可见,不施肥处理区农田 N_2O 通量(N)全年平均 10.6μg/(m^2·h),各生育期的 N_2O 通量均低于施肥处理区的 N_2O 通量相应值。N_2O 通量以施用有机肥和化肥处理区为最高,全年平均(N)24.2μg/(m^2·h),单施化肥处理区的 N_2O 通量介于二者之间,年均(N)18.5μg/(m^2·h)。小麦生育期间的 N_2O 通量高于玉米生育期

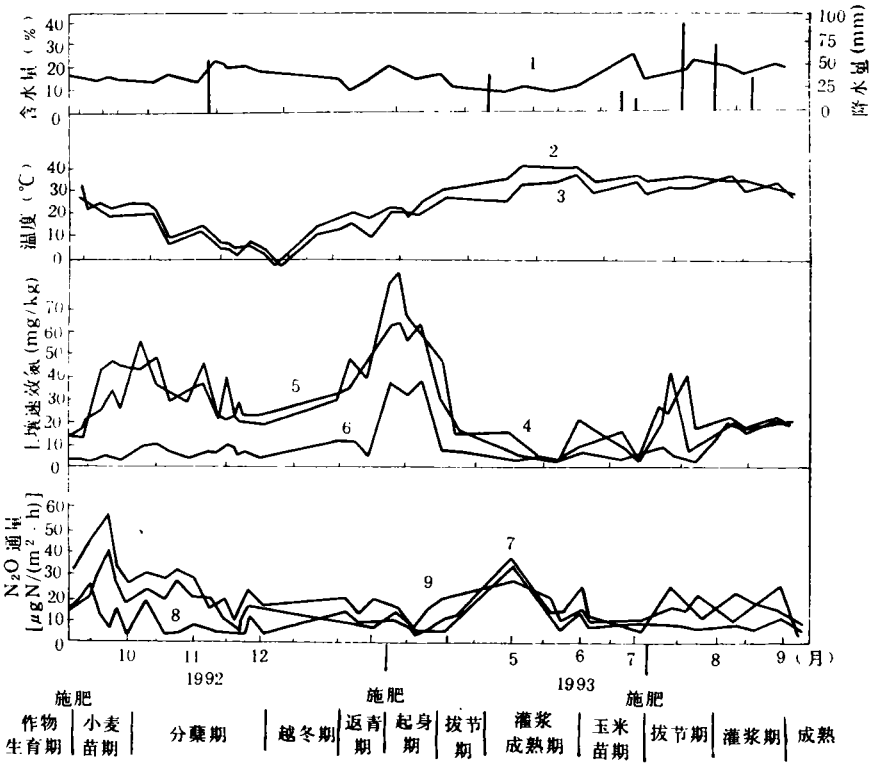

图1 全年 N_2O 通量及土壤因素的变化趋势

1.土壤含水量 2.气温 3.地温(10cm) 4.有机肥区 5.化肥区 6.对照区 7.对照区[年均(N)10.6μg/(m^2·h)] 8.化肥区[年均(N)18.5μg/(m^2·h)] 9.有机肥区[平均(N)24.2μg/(m^2·h)]。

N_2O 通量，其原因在于小麦苗期和灌浆期的土壤湿度大，通气条件差，土壤中 NO_3^--N 含量高，提供了硝化和反硝化过程的氮源，使 N_2O 通量值提高。玉米生育期间，对照区的 N_2O 通量变化不大，而施肥处理区的 N_2O 通量波动较大。主要因素是施肥、灌水或降雨的影响。追肥前3种处理区的 N_2O 通量(N)为①9μg/(m²·h)；②6μg/(m²·h)；③11μg/(m²h)，追肥后第7d，区通量增到②26μg/(m²·h)，③区达到18μg/(m²·h)，比追肥前增加了2—4倍。

2.2 各生育期 N_2O 通量的变化

(1)小麦苗期 本试验在作物生育期间进行了 N_2O 通量的连续观测。1992-09-25，测定的起始通量值(N)分别是①区：14.8μg/(m²·h)，②区：10.9μg/(m²·h)，③区：27.8μg/(m²·h)，当天取土样分析的 NO_3^--N 含量①区：1.51mg/kg，②区：12.53mg/kg，③区：9.12mg/kg；NH_4^+ 含量是①区：1.75mg/kg，②区：0.38mg/kg，③区：1.05mg/kg。由此可见，不施肥区的初始值除 NO_3^--N 低于施肥处理区数值外，NH_4^+-N 和 N_2O 通量均高于施肥处理区的初始值.以后的通量变化则与施肥的关系密切。

施肥处理区的 N_2O 通量在苗期迅速增加，以③处理区为最高，对照区的通量变化波动小。施肥后第7d，小麦播种后土壤速效氮含量因土壤硝化作用强烈，使施肥处理区的速效氮分别增加了7mg/kg(化肥区)和9mg/kg(有机肥区)，而对照区仅增加了0.8mg/kg，因而，N_2O 通量也迅速提高，分别是②区：44.9μg/(m²·h)，③区：43.2μg/(m²·h)，对照区只是10μg/(m²·h)与初始值接近。苗期的 N_2O 通量达到年前的排放高峰。

(2)分蘖期 进入分蘖期以后，尽管土壤中 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 及速效氮总量的变化有高有低，出现多次峰值，而 N_2O 通量却表现出逐渐降低的趋势。这和气温逐渐下降，小麦根系发育，分蘖期植株吸收更多的速效氮有关。

(3)返青期 越冬期土壤冻结，植株停止生长，N_2O 通量也降为最低值.12-16—18，平均值分别是①区：3.6μgN(m²·h)，②区：15.7μgN(m²·h)，③区：16.1μg/(m²·h)。此后进入越冬期，直至3月初土壤化冻，小麦返青开始继续观测。03-03 的 N_2O 通量值(N)为①区：14.6μg/(m²·h)，②区：20.4μg/(m²·h)，③区：20.0μg/(m²·h)。03-19 追施起身肥以后，土壤速效氮出现峰值，此时气温也升高，N_2O 通量先升高后降低。4月中旬进入拔节期以后，营养生长加快，土壤速效氮消耗多，含量值急剧下降，至抽穗，灌浆期达到最低值，而 N_2O 通量却又出现年后的一次高峰。这是因为气温升高，降水增加的缘故。05-11 浇水后，12—13日又有2次小雨，05-18 的 N_2O 通量(N)达到①区：34.9μg/(m²·h)，②区：37.8μg/(m²·h)，③区：29.4μg/(m²·h)。

(4)灌浆后期 小麦灌浆后期，土壤速效氮耗竭，氮源不足，此时尽管气温和地温都很高[气温35°C，地温(5cm)41—42°C]，N_2O 通量却降至①区：7.1μg/(m²·h)，②区：14.9μg/(m²·h)，③区：9.6μg/(m²·h)，土壤速效氮相应为①区：2.6mg/kg，②区：1.0mg/kg，③区：2.9mg/kg，都低于起始值。

(5)玉米生长期 玉米苗期土壤速效氮略有回升，而 N_2O 通量仍然比较低。07-21 追施拔节肥以前，N_2O 通量值(N)①区：10.7μg/(m²·h)，②区：11.6μg/(m²·h)，③区：15.9μg/(m²·h)；土壤速效氮则是①区：4.27mg/kg，②区：4.81mg/kg，③区：8.71mg/kg。追施肥后第7d观测，N_2O 通量①区：8.9μg/(m²·h)，②区：26.2μg/(m²·h)，③区：18.5μg/(m²·h)，土壤速效氮①区：6.0mg/kg，②区：41.8mg/kg，③区：24.8mg/kg，比先前增加了一些，这说明 N_2O 通量与土壤速效氮含量变化密切。玉米生长后期土壤速效氮稳定在20mg/kg，左右，N_2O 通量却出现3次峰值。这期间的主要影响因素是3次降雨(分别为101mm，75.9mm 和 58.5mm)，雨量都接近或超过1次灌水量(约60mm)，使土壤湿度达到20%(约为田间持水量的70%左右)，通气条件差，气温高，有利于 N_2O 的生成与释放。

综观小麦和玉米生长期 N_2O 通量可知，小麦生育期 N_2O 通量要高于玉米期 N_2O 通量，这主要是作物种类和地温的影响。玉米生育期短，速效氮利用率高，加之地温过高，反不利于土壤

硝化和反硝化反应的进行，导致 N_2O 通量较低。

2.3　环境因素对 N_2O 通量的影响

地温、气温、土壤湿度及 NO_3^--N、NH_4^+-N 含量都是影响 N_2O 通量变化的环境因素。通过 N_2O 通量与相应的地温、气温、土壤湿度等的相关分析发现，只有气温和地温与 N_2O 通量有线性相关关系（相关系数 $R=0.29$—0.37，样本数 $N=69$），都达到了 5%的检验水平。而对其它因素的回归分析得出线性相关系数不显著。其主要原因，一方面是因为 N_2O 通量受各种因素综合影响外，还受土壤内部的物理、化学和生物过程的影响，各因素之间相互有正效应和负效应，另一方面也因为某些因素影响呈“滞后效应”，即对后期 N_2O 通量变化产生影响。如土壤速效氮含量变化就对 N_2O 通量有“滞后效应”[8]，其次是土壤湿度的变化也有类似的情况[9,10]。

2.4　农田系统 N_2O 排放量与施氮量的关系及排放总量估算

氮肥转化为 N_2O 的比例与化肥种类，耕作方式等许多因素有关。计算氮肥排放 N_2O 的量需将在相同农业管理措施条件下的施氮肥由与对照田的 N_2O 排放通量相比较，在扣除土壤自然排放量后才能得出纯氮肥使用过程中排放 N_2O 的比例。表 1 列出了此次实验和先前工作的一些计算结果。由表 1 数据可知，施尿素区和施有机肥区土壤排放 N_2O 的量占相应总施氮量的 0.54%和 0.70%，由尿素和有机氮肥排放 N_2O 的比例分别是 0.23%和 0.39%。与 1990 年的工作和 Mosier[11]的结果相比，此次实验结果较低。这是因为此次测定工作周期为 1a，而不是某一阶段，此结果是各种情况的平均反映。

本次实验是在全年（除土壤封冻期间外）测定的基础上获得了小麦-玉米轮作期的 N_2O 通量。由于小麦-玉米轮作田占华北平原粮食作物耕地面积的 80%以上，因此，以此次测定结果为代表可以简单估算华北地区 N_2O 排放总量。初步以 0.50%的排放率计算，那么华北平原约 1333 万 hm^2 耕地的 N_2O 排放总量则是每年约 2.25×10^4t。要准确估算整个华北平原农田 N_2O 的年排放总量，还要进行不同种植制度，不同施肥种类和施肥量等农田的 N_2O 通量周年测定，这将是今后的研究任务。

表 1　农田系统 N_2O 排放量与施氮量的关系

作物	肥料	施氮量 (kg/hm^2)	N_2O 通量(N) [$\mu g/(m^2\cdot h)$]	年排放量(N) [$kg/(hm^2\cdot a)$]	占氮肥施量百分数(%)	化肥释放比例(%)	文献
大麦	NH_4NO_3	56	25	2.14	3.9	1.6	[11]
大麦	有机肥	71	29	2.54	3.6	1.8	
大麦		0	14	1.23			[11]
小麦	UR	157.5	20	1.75	1.1	1.0	[4]
苜蓿	UR	157.5	22	1.93	1.2	1.1	[4]
小麦		0	2	0.18			
小麦-玉米	UR	300	18.5	1.62	0.54	0.23	本实验
小麦-玉米	有机肥	307.7	24.2	2.11	0.70	0.39	本实验
小麦-玉米		0	10.6	0.93			

3　结论

（1）影响农田土壤排放 N_2O 通量和排放总量的自然环境因素中，土壤温度和湿度是主要因素。农事活动中主要影响因素是氮肥施用量、施肥方式和灌溉等。不同施肥处理方式的农田排放 N_2O 通量以③处理方式最高，这与有机-无机肥结合使用，土壤生物活性增强，硝化和反硝化过程有充足的氮源及生物活动有充足的能量有关。

（2）对 N_2O 通量周年测定结果表明，华北农田小麦-玉米轮作期的 N_2O 通量（N）变化为 10.6—24.2$\mu g/(hm^2\cdot h)$，年排放量为 0.93—2.11$kg/(m^2\cdot a)$。施化肥农田排放 N_2O 量占氮肥施用量的 0.54%，施有机-无机（下转第 67 页）

表 4　大同市大气中颗粒物上有机污染物监测结果

苯系物和芳烃类	苯并(ghi)苝
1,4-二甲基苯	苝
1,2,3-三甲基苯	茚并(1,2,3-c,d)芘
1,3,5-三甲基苯	二苯芘(a,h)蒽
萘	晕苯
1-甲基萘	**烷烃类**
2-甲基萘	乙基环戊烷
1,3-二甲基萘	甲基环己烷
十氢-2,6-二甲基萘	庚烷
十氢-2,6-二甲基萘	三甲基环戊烷
联苯	三甲基己烯-(1)
苊	四甲基戊烷
苊烯	正壬烷
芴	正葵烷
甲基芴	正十一烷
菲	甲基十三碳烷
蒽	正十四烷
甲基菲	环十四烷
苯基萘	正十五烷至正三十三烷
二甲基菲	**其他有机污染物**
萤蒽	苯酚
芘	硝基苯酚
甲基芘	3-甲基,1-苯酚
苯并(b)芴	1-萘-丙醇
苯并(c)菲	异苯并呋喃二酮
苯并(a)蒽	苯并(h)喹啉
䓛	苯并(f)喹啉
三亚苯	吖啶
甲基䓛	菲啶
苯并(j)萤蒽	g-蒽腈
苯并(b)萤蒽	二苯并(c,h)-1,5-氮杂萘
苯并(k)萤蒽	二恶茂烷
苯并(e)芘	酞酸二正丁酯
苯并(a)芘	酞酸二异辛酯

其中很多化合物有致癌和致突变作用。图 2 为 TSP 萃取物经硅胶柱预分离后第二组分的总离子流图，示多环芳烃部分，由图 2 可以看出，前面部分仍极为复杂，在实际操作中用减少进样量和调整色谱条件加以解决。多环芳烃部分由于含量少，需用 HPLC 的方法进一步分析确证。

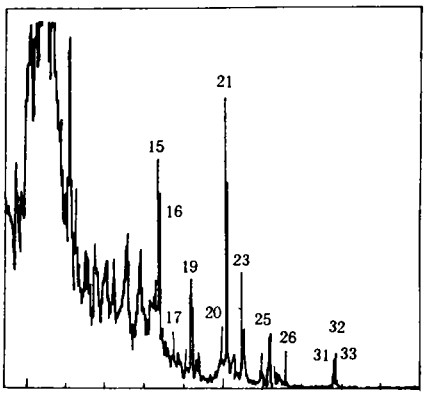

图 2　大同市 TSP 萃取物第二组分的总离子流图

图中数字所代表的化合物同表 4

2.3　讨论

按我国 1982 年发布的大气环境质量标准国家二类地区 IP 的日均值不得大于 0.15mg/m³，本次测定结果，除非采暖期对照点的样品外，其余各点全部超标。与我们对北京市的测定结果(待发表)相比，IP 浓度大同市与北京市基本处于同一水平，但颗粒物上有机污染物的浓度却较北京高。本次虽鉴定出 83 种有机污染物，但只是污染物中一部分，很多未知物有待进一步鉴别。

参考文献

1　赵振华，张湘桥等. 环境科学学报. 1983, **3**(4):335
2　赵振华，全文熠等. 环境科学学报. 1991, **11**(2):216

(上接第 35 页)肥农田排放 N_2O 量占氮肥施用量的 0.70%。

(3)初步以 0.50%的氮肥排放率估算华北平原约 1333 万 hm^2 农田施肥利用后造成 N_2O 总排放量为 2.25×10^4t/a。

参考文献

1　Bouwman A F. The Soil and Greenhouse Effect, Chichester: John Wiley & Sons, 1990:60
2　叶笃正等主编，当代气候研究. 北京：气象出版社，1991: 280
3　叶笃正主编，中国的全球变化预研究. 北京：气象出版社，1992: 94
4　苏维瀚等. 环境化学. 1992, **11**(2):26
5　Bremner, J M et al. J Environ. Qual. 1982, **10**: 77
6　Goodroad L L et al. Soil Biochem. 1984, **16**:39
7　Hutchinson G L et al. Science. 1979, **205**:1125
8　Drury C F et al. Soil Sci. Soc. Am. J. 1992, **56**:716
9　Goreau T L. Appl. Environ. Microbiol.. 1980, **40**:526
10　衣纯真等. 北京农业大学学报. 1993, **19**(3): 85
11　Mosier A R et al. J. Environ. Qual. 1982, **11**:78

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

Immobilized-Microbial-Cell A/O Process. Wang Lei . (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085), Yu Yuxin (Dept. of Environ. Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16** (1), 1995, pp. 29—31

Immobilized-microbial-cell (IMC) technology, a new technique for biological wastewater treatment, was used to treat a spent tetracycline liquor. The experimental results showed that the removals of both COD and tetracycline were 96% at a COD loading of 2.07 kg/(m^3 • d). As compared with a conventional A/O process, there was an increase of COD loading by 16.3% and of gas production by 4.57 times. The IMC technology was found to have some further advantages, including a more stable operation and allowing a higher pollutant loading and less sludge generation.

Key words: anaerobic-aerobic process, tetracycline, immobilized microbial cell.

Flux of N_2O Emission from the Fields in a Wheat and Maize Rotation System. Zeng Jianghai et al. (Institute of Agricultural Modernization, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021), Song Wenzhi et al. (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(1), 1995, pp. 32—35

Nitrous oxide fluxes from the fields in a wheat and maize rotation system were studied in the North China Plain from September 25, 1992 to September 21, 1993. The total emission of N_2O was also estimated according to the fluxes of nitrous oxide measured in a year period. The fluxes of N_2O are 10.6— 24.2 μg N/(m^2 • h) with the correspondingly annual emission of 0.93—2.11 kg N/(hm^2 • a). The N_2O emissions from urea-fertilized and organic-fertilized plots account for about 0.54% and 0.70% of the amount of applied fertilizers, respectively.

Key words: N_2O, flux, emission, environmental factor.

Study on the Removal of Odor Gas H_2S by a Coaxial Streamer Corona. Liu Linmao et al. (Dept. of Environ. Sci., Northeast Normal Univ., Chuang Chun 130024): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16** (1), 1995, pp. 36—38

The pulsed streamer corona have been used to remove odor (H_2S). The H_2S removal efficiency and power utilization efficiency were compared in the cases of negatively pulsed voltage, positively pulsed voltage and DC voltage. The results show that the pulsed streamer corona is effective to remove H_2S. The negatively pulsed streamer corona was found to have a H_2S removal efficiency of 88% and a power utilization efficiency of 6.74g/(kw • h). In the same operating condition with negatively pulsed streamer corona, the positively streamer corona was found to have a H_2S removal efficiency of 45% and a power utilization efficiency of 2.27g/(kw • h).

Key words: coaxial streamer corona, H_2S, removal efficiency, power utilization efficiency.

Study on the Cultivation of Granular Sludge in a UASB reactor with a Foaming Porous Calcium Alginate Colloid. Xu Dandong and Xiao Hong (Dept. of Environ. Eng., Lanzhou Railway Institute, Lanzhou 730070): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(1), 1995, pp. 39—41

Based on the experiment, this paper describes the effects of foaming porous calcium alginate colloids, as the nuclues of biological granula and the promoter of granular sludge, on the accelaration of operation at the beginning of upflow in an anaerobic sludge bed reactor. It also indicates the process of producing calcium alginate colloids. In the reactor, sludge was cultivated immediately after the microorganisms were introduced, then the produced colloids were taken to mix with the microorganisms. After a continuous 20 day operation, the measurements showed that the content of CH_4 decreased to 70% and the removal rate of TOC reached 70% when calcium alginate colloids, as the nucleus of granula, were replaced by microorganisms with the sedimentation of biological granula at a rate of 300mm/min and a number of about 700 particles/ml. A satisfactory result was obtained by giving a granular sludge of high activities and better sedimentation performance.

Key words: granular sludge, UASB reactor, alginic acid, anaerobic treatment.

Hydrogen production from soybean wastewater by Immobilized Photosynthetic Bacteria. Liu Shuangjiang et al. (Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(1), 1995, pp. 42—44

This paper presents the results of hydrogen production from soybean wastewater by immobilized photosynthetic bacteria (IPSB). The results showed that the IPSB in sodium alginate could produce hydrogen from a wide range of the concentrations of soybean wastewater. When the concentrations of wastewater ranged from 7560 to 12600 mgCOD/L, the IPSB could maintain stable hydrogen production for 260 hours, with an average gas production rate