

邵立明, 谷惠丽, 何品晶. 2009 通风填埋层原位脱氮: 回灌渗滤液和垃圾组成的影响 [J]. 环境科学学报, 29(1): 151– 155
Shao L M, Gu H L, He P J. 2009. In situ nitrogen removal under intermittent aeration conditions: Impacts of refuse and recycled leachate composition [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(1): 151 – 155

通风填埋层原位脱氮: 回灌渗滤液和垃圾组成的影响

邵立明, 谷惠丽, 何品晶*

同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092

收稿日期: 2008-02-12 录用日期: 2008-10-09

摘要: 为研究不同的垃圾组成和回灌渗滤液性质对间歇通风填埋层原位脱氮的影响, 在固定的间歇通风条件下, 对新鲜垃圾填埋渗滤液自身回灌、分别以新鲜和部分稳定渗滤液回灌部分稳定垃圾填埋层的氮转化过程进行了模拟实验. 结果表明: 新鲜垃圾填埋渗滤液自身回灌的氮溶出率 (82.4%) 和总去除率 (61.4%), 高于新鲜和部分稳定渗滤液回灌部分稳定垃圾填埋层; 而部分稳定渗滤液回灌部分稳定垃圾填埋层的氮总去除率 (58.0%) 和渗滤液氮净去除率 (32.2%) 又高于新鲜渗滤液回灌同样的部分稳定垃圾填埋层 (氮总去除率 38.2% 和渗滤液氮净去除率 21.3%). 造成这些差异的主要原因是垃圾的生物可降解性, 以及填埋层内氮负荷与通风供给的硝化可利用分子氧的比例不同.

关键词: 生物反应器填埋; 填埋垃圾组成; 渗滤液性质; 间歇通风; 原位脱氮

文章编号: 0253-2468(2009)01-151-05 中图分类号: X705 文献标识码: A

In situ nitrogen removal under intermittent aeration conditions: Impacts of refuse and recycled leachate composition

SHAO Lin g GU Huili HE Pin jing*

State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse Key Laboratory of Yangtze River Water Environment College of Environmental Science and Engineering Tongji University, Shanghai 200092

Received 12 February 2008; accepted 9 October 2008

Abstract In order to study the impact of diverse compositions of refuse and recycled leachate on in-situ nitrogen removal under intermittent aeration conditions, simulated landfill columns were set up to investigate nitrogen conversion. Different columns included a) recycling leachate to produce a fresh refuse layer; b) recycling fresh or c) partially stabilized leachate to partially stabilize the refuse layer. The results indicated that the dissolution rate (82.4%) and total removal rate (61.4%) of nitrogen for the column recycling leachate into fresh refuse were higher than those for the columns recycling fresh or partially stabilized leachate to partially stabilized refuse. The total removal rate of nitrogen (58.0%) and the net removal rate of nitrogen in leachate (32.2%) for the column recycling partially stabilized leachate to partially stabilized refuse were higher than those (38.2% and 21.3%, respectively) for the column recycling fresh leachate to partially stabilized refuse. These differences could be attributed to the different biodegradability of the refuse samples and the different ratios of nitrogen loading in the landfill layer to the available oxygen during the nitrification process.

Keywords bioreactor landfill; refuse composition; leachate characteristics; intermittent aeration; *in situ* nitrogen removal

1 引言 (Introduction)

回灌渗滤液的生物反应器填埋可以提供有利于降解有机物质的条件, 但由于厌氧环境中没有氨氮降解的途径, 且渗滤液回灌增加了氨化速率, 导致了与传统卫生填埋相比渗滤液中高浓度氨氮的积累 (Berge *et al.*, 2005). 向填埋层中通入少量空

气, 可以在层内形成好氧和厌氧区域的空间分布, 可使渗滤液中的氨氮通过在填埋层内同时实现硝化和反硝化, 而得到有效地去除 (Barlaz *et al.*, 2002). Onay 和 Pohland (1998) 通过把填埋场分为好氧、兼氧、厌氧区, 最早证实了填埋层原位氮去除的可能. Prantl 等 (2006) 研究了通风速率和回灌量对陈垃圾中含氮有机物质转变的影响, 结果表明通风

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2003AA644020); 国家自然科学基金重点项目 (No. 50538080)

Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA644020) and the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 50538080)

作者简介: 邵立明 (1962—), 男, 教授; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: solidwast@mail.tongji.edu.cn

Biography: SHAO Lin ing (1962—), male, professor; * **Corresponding author** E-mail: solidwast@mail.tongji.edu.cn

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

可引起氨氮快速完全降解,而回灌量对氨氮去除的影响较小. Shao等 (2008)观察到向新鲜垃圾填埋层通入空气可以有效降低渗滤液中的氮负荷. Price等 (2003)研究了不同降解时期垃圾的反硝化能力,指出新鲜垃圾更利于反硝化过程的进行. 但现有研究均未能指出不同填埋垃圾组成对原位氮去除的影响,而回灌渗滤液性质对微量通风条件下原位氮去除的研究也鲜有报道.

本文利用垃圾填埋模拟柱,采用向柱中间歇通入空气的方法,研究了不同填埋垃圾组成及回灌渗滤液性质对排出渗滤液中氮成分变化的影响,同时也监测了气相中微量氮: N_2O 和 NH_3 的释放.

2 实验装置和实验方法 (Experimental device and methods)

2.1 实验装置

实验采用 4 个填埋模拟柱进行,各柱均为直径 100 mm,高度 300 mm 的 PMMA 塑料圆柱体 (见图 1). 填埋模拟柱设有用于渗滤液回灌和排出、通风及气体取样的接口,并可在实验周期内均保持气密性.

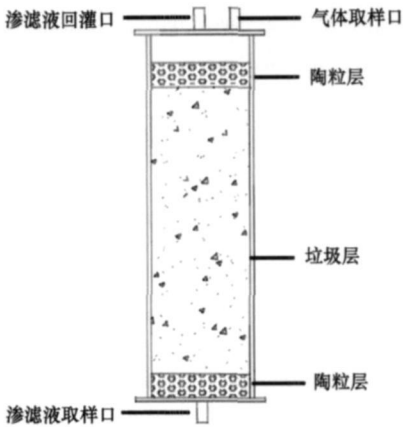


图 1 实验装置图

Fig 1 Landfill simulation column

2.2 实验垃圾组成

本实验所选用垃圾分为新鲜垃圾和部分稳定垃圾两种. 新鲜垃圾各组分取自上海市某居民区,再依照上海市生活垃圾组成制备 (何晶晶等, 2003). 新鲜垃圾的物化组成见表 1,纤维素与木质素的比值约为 2.81.

表 1 垃圾组成和性质

Table 1 Composition and characteristics of the refuse samples

质量组成	食品垃圾	塑料	纸张	橡胶皮革	织物	玻璃和金属	其它	含水率 (湿基质量)
新鲜垃圾	61.6%	15.0%	7.1%	5.0%	4.7%	2.3%	4.3%	61.73%
部分稳定垃圾	- ¹⁾	12.6%	4.7%	3.7% ²⁾	3.8%	0.5%	74.5% ³⁾	56.80%
元素组成 (干基质量)	C	H	N	S	O	灰分		
新鲜垃圾	36.5%	2.4%	3.1%	0.12%	28.7%	29.2%		
部分稳定垃圾	18.4%	1.4%	1.8%	0.4%	8.4%	69.6%		

注: 1) 没有可以识别的食品垃圾, 2) 石头, 3) 不能分拣的剩余物

部分稳定垃圾取自杭州市某大型生活垃圾填埋场的生物反应器填埋单元,其物化组成见表 1,纤维素与木质素的比值为 0.9. 垃圾整体呈黑色,主要由塑料、织物和渣土组成.

2.3 实验方法

垃圾装填前先破碎至粒径小于 1 cm,新鲜垃圾同时接种 10% (湿基质量) 的好氧浓缩污泥以启动反应. 装填时,在填埋垃圾底部和顶部各设置 25 mm 的陶粒,以利于回灌渗滤液的均匀分布. 装填后,即向填埋模拟柱中加入蒸馏水调节垃圾含水率达饱和状态;密闭后,再通入氮气以除氧. 各柱装填完毕后的有关操作参数小结于表 2.

表 2 填埋模拟柱操作参数

Table 2 Operational parameters of the packed columns

样品 柱号	装填垃圾 类型	总装填量 /g	装填密度 /(kg·m ⁻³)	含水率
1号柱	新鲜垃圾	849.9	约 550	71.2%
2号柱	新鲜垃圾	850.1		72.4%
3号柱	部分稳定垃圾	940.9	约 610	62.2%
4号柱	部分稳定垃圾	952.6		62.0%

1号柱装填新鲜垃圾,不进行通风和渗滤液回灌,模拟传统卫生填埋场操作情况. 2、3、4号柱模拟填埋层通风操作,每天通风 2 次,每次通过气密性注射器向柱内通入 1.8 L 空气 (保证填埋柱空隙中气体被新鲜空气完全置换);同时,每天还分别回灌 2 次渗滤液,回灌渗滤液类型与负荷: 2号柱回灌自身

产生的渗滤液(组成与排出液相同),按照其排出的渗滤液量调整其回灌量;3、4号柱分别回灌新鲜或部分稳定渗滤液(取自上海某生活垃圾卫生填埋场和杭州市某大型生活垃圾填埋场的生物反应器填

埋单元),回灌渗滤液的性质见表3。每次回灌量均为50 mL。考虑到实际填埋层的温度,上述模拟柱均置于温度控制在(35±5)℃的保温箱内。

表 3 3和 4号柱回灌渗滤液的性质
Table 3 Characteristics of recycled leachate in columns 3 and 4

模拟柱	pH	COD /(mg L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N /(mg L ⁻¹)	KN /(mg L ⁻¹)	硝态氮 /(mg L ⁻¹)
3号柱	5.8~6.5	78000~96000	1551~2687	1842~3013	43~73
4号柱	7.6~7.8	2043~3321	931~995	1074~1132	46~62

在实验的前20 d每2 d 1次,之后每3 d 1次采集渗滤液进行测试。对通风填埋柱,每次通风前采集气体样品,而对厌氧填埋柱每次采集渗滤液时进行气体样品采集。渗滤液测试指标与方法(国家环境保护总局,2002):COD(重铬酸钾法),氨氮(NH₄⁺-N,蒸馏滴定法),凯氏氮(KN,消化蒸馏滴定法),硝态氮(NO₂⁻-N+NO₃⁻-N,戴氏合金还原法);气相测试指标与方法:N₂O(GC122气相色谱仪,上海精密科学仪器有限公司),NH₃(采用硼酸吸收纳氏试剂比色法(国家环境保护总局,2002))。

3 结果 (Results)

3.1 渗滤液中氮成分的变化

各柱排出渗滤液中氨氮的变化列在图2中。氨氮的浓度与装填垃圾的组成、回灌渗滤液的性质以及是否通风有关。在运行初期,排出渗滤液的氨氮浓度与填埋垃圾类型有关。装填新鲜垃圾的填埋柱(1和2号柱)排出渗滤液的NH₄⁺-N浓度在初期8 d由200 mg L⁻¹上升到600 mg L⁻¹,而装填部分稳定垃圾的填埋柱(3和4号柱)其排出渗滤液的NH₄⁺-N浓度在初期8 d仍保持在零限附近,之后才迅速上升。这主要是由于新鲜垃圾蛋白质水解作用引起了初期氨氮的快速溶出;而部分稳定垃圾可生物降解组分已部分降解,在初期会吸附回灌渗滤液中的氨氮,降低其在排出渗滤液中的浓度。吸附饱和后NH₄⁺-N浓度变化与回灌渗滤液的NH₄⁺-N浓度有关:回灌渗滤液NH₄⁺-N浓度为2000 mg L⁻¹的3号柱,排出渗滤液的NH₄⁺-N浓度在30 d后仍保持在2500 mg L⁻¹以上;回灌渗滤液NH₄⁺-N浓度为1000 mg L⁻¹的4号柱,其排出渗滤液的NH₄⁺-N浓度从第36 d的1082 mg L⁻¹下降到第78 d的544 mg L⁻¹。通风利于氨氮的代谢,同样装填新鲜垃圾

的1号和2号柱,间歇通风的2号柱排出渗滤液的NH₄⁺-N浓度在30 d以后就低于500 mg L⁻¹,而厌氧填埋柱排出渗滤液的浓度仍高于1000 mg L⁻¹。这反映出填埋层内的局部好氧条件,有利于硝化细菌的生长,增强了对氨氮的去除能力,使渗滤液中氨氮浓度降低(于晓华等,2004)。

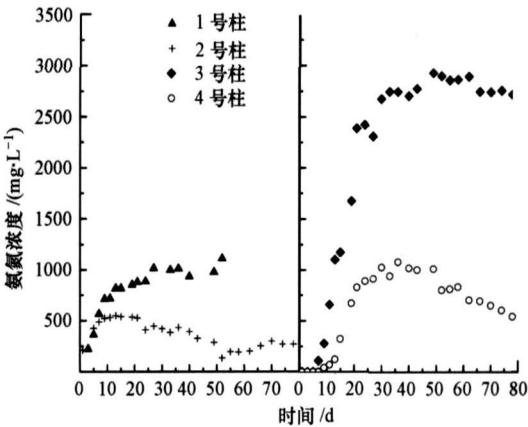


图 2 不同填埋柱排出渗滤液氨氮的时变过程
Fig. 2 Temporal evolution of NH₄⁺-N in the leachate from different columns

图3是不同填埋柱排出渗滤液中的KN变化情况。由于回灌渗滤液中KN主要形态是NH₄⁺-N,因此,各填埋柱排出渗滤液中KN浓度的变化与NH₄⁺-N的变化趋势一致。

填埋柱排出渗滤液硝态氮的浓度变化(见图4)主要与是否通风有关。对于通风的填埋模拟柱(2、3、4号柱),排出渗滤液的硝态氮浓度相对较高,均在50 mg L⁻¹上下波动;而厌氧填埋柱(1号柱),排出渗滤液的硝态氮在40 d后即低于20 mg L⁻¹。在厌氧填埋场内,无硝化过程形成硝态氮,而新鲜垃圾又可提供充足的碳源用作反硝化过程基质(Price et al., 2003),因此硝态氮浓度会一直很低。通风填

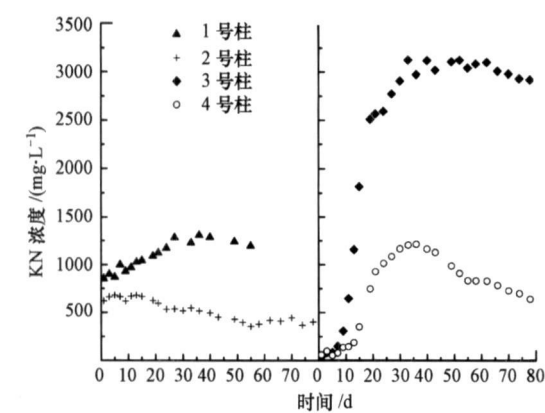


图 3 不同填埋柱排出渗滤液凯氏氮的时变过程

Fig 3 Temporal evolution of KN in the leachate from different columns

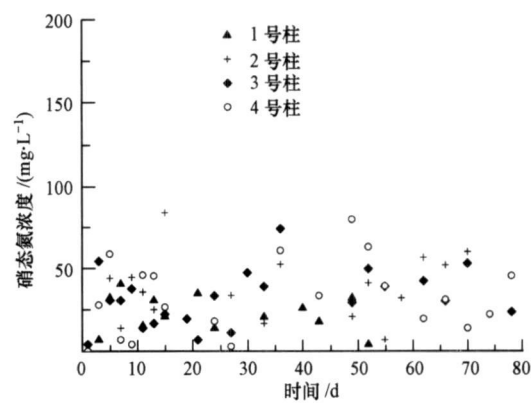


图 4 不同填埋柱排出渗滤液硝态氮的时变过程

Fig 4 Temporal evolution of the sum of NO₂⁻-N and NO₃⁻-N in the leachate from different columns

埋柱间歇通入一定量的氧气, 填埋层内就存在同时的硝化和反硝化过程, 表现为渗滤液硝态氮的质量浓度略有升高。

3 2 不同填埋柱内氮的转化

不同填埋柱内氮的转化结果列于表 4 从表中可以看出, 间歇通风且同时回灌渗滤液的填埋柱 (2 3 4号柱)内垃圾的含氮物质降解比例较高, 分

表 4 不同填埋柱内氮的转化

Table 4 Nitrogen conversion in different columns

模拟柱	垃圾		回灌渗滤液			排出渗滤液			气体	
	初始氮 /g	终态氮 /g	NH ₄ ⁺ -N /g	硝态氮 /g	有机氮 /g	NH ₄ ⁺ -N /g	硝态氮 /g	有机氮 /g	N ₂ O /mg	NH ₃ /mg
1号柱	10.08	- ¹⁾	0	0	0	0.19	0.0049	0.095	0.0030	- ²⁾
2号柱	10.08	1.77	0	0	0	1.40	0.16	0.56	0.79	1.18
3号柱	9.81	3.29	12.83	0.33	3.29	11.47	0.18	1.29	0.22	4.04
4号柱	9.93	2.55	5.23	0.25	0.82	3.63	0.18	0.46	29.64	1.79

注: 1) 填埋模拟柱内垃圾代谢缓慢, 未进行固体样品的测定; 2) 产甲烷阶段的滞后, 无足够气体样品进行测试

别为 82.4%、66.5% 和 74.3%; 且除 2 号柱通过渗滤液排出的氮量为垃圾降解量的 21% 外, 3 和 4 号柱回灌渗滤液带入的氮量均小于渗滤液排出量. 这说明间歇通风填埋柱内同时存在着硝化和反硝化过程; 同时, 对产生气体中的 N₂O 和 NH₃ 监测结果也表明, 两者合计占填埋柱中减少氮量的比例最大仅为 0.2%, 可见间歇通风填埋柱内氮的主要去除途径为通过完全的硝化反硝化过程转化为 N₂.

4 讨论 (Discussion)

本研究各渗滤液回灌和通风填埋柱的操作方法 (回灌水力负荷和通风量) 相同, 因回灌渗滤液和填埋垃圾组成的不同, 各柱的氮代谢情况仍有一定的差异. 2、3、4 号柱内都有明显的氮代谢过程出现, 各柱的垃圾 (固相) 氮降解率分别为 82.4%、66.5% 和 74.3%; 固相和液相氮总去除量分别为 6.19、10.03 和 9.41 g, 总去除率分别为 61.4%、38.2% 和

58.0%; 而 2、3、4 号柱中未被完全反硝化的氮 (液相硝态氮和气相 N₂O) 占氮总去除量比例分别为 2.6%、1.8% 和 2.2%; 3、4 号柱渗滤液的氮净去除率为 21.3% 和 32.2%. 从这些实验数据可以发现, 回灌渗滤液和垃圾组成对间歇通风填埋层氮转化的影响主要表现为: 1) 部分稳定垃圾生物可降解组分含量低于新鲜垃圾, 垃圾的含氮物分解 (溶出) 率相应地小于新鲜垃圾. 2) 新鲜渗滤液的有机物和氮负荷均高于部分稳定渗滤液, 同样回灌至部分稳定垃圾填埋层且通风条件相同时, 回灌新鲜渗滤液的氮总去除率和渗滤液氮净去除率均低于部分稳定渗滤液, 这应与在固定的通风条件下, 硝化电子受体 (分子氧) 供应限制有关. 事实上, 前者的氮总去除量尚略大于后者; 同时, 新鲜渗滤液中有机物的好氧降解也竞争了部分分子氧, 不利于氮的硝化; 这可从图 5 (不同填埋柱排出渗滤液的 COD 时变过程) 与图 2 和图 3 的比较发现: 当 40 d 后, 3 号柱渗

滤液的 COD因填埋层内已建立甲烷化代谢状态而降低至低值后,其 KN和 NH_4^+-N 浓度亦有所下降,表明脱氮效果改善。3)本研究条件下,渗滤液和垃圾组成对反硝化的影响不明显,但回灌新鲜渗滤液与部分稳定渗滤液相比,其反硝化率,尤其气相不完全反硝化产物的产率更低,表明新鲜渗滤液中更丰富的碳源仍有利于完全的反硝化脱氮。

综合上述操作条件下的氮去除率和回灌后渗滤液的氮含量,渗滤液自身回灌的效果最佳,但考虑到这种方法在实际应用中会受到渗滤液调蓄池容量的限制,合适的替代方法是新鲜渗滤液先在厌氧填埋层中回灌,使之部分稳定,再回灌至通风填埋层中完成有机物和氮的完全去除。

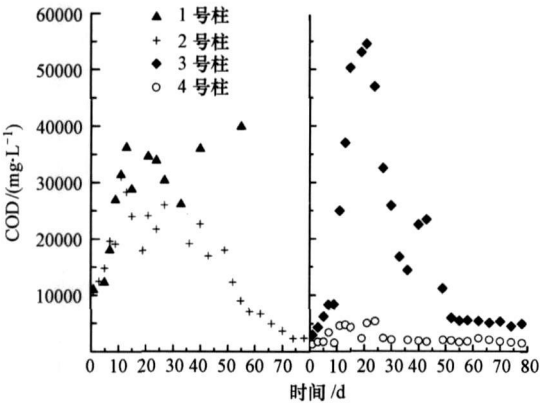


图 5 不同填埋柱排出渗滤液的 COD 时变过程

Fig 5 Temporal evolution of COD in the leachate from different columns

5 结论 (Conclusions)

1)填埋层间歇通风和渗滤液回灌为垃圾与渗滤液中的氮通过硝化和反硝化过程去除提供了条件,本研究中新鲜垃圾填埋渗滤液自身回灌、新鲜和部分稳定渗滤液分别回灌部分稳定垃圾填埋层的固相和液相氮总去除率分别为: 61.4%、38.2%和 58.0%。

2)填埋垃圾和渗滤液组成主要影响垃圾中氮溶出率、氮总去除率和渗滤液中氮净去除率;新鲜垃圾填埋渗滤液自身回灌的氮溶出率和总去除率,高于新鲜和部分稳定渗滤液回灌部分稳定垃圾填埋层;而部分稳定渗滤液回灌部分稳定垃圾填埋层的氮总去除率和渗滤液氮净去除率,又高于新鲜渗

滤液回灌同样的部分稳定垃圾填埋层。

3)在本研究的条件下,从垃圾和渗滤液中去除的氮主要通过完全的硝化和反硝化过程转化为氮气,附带的氨挥发和氮氧化物释放率甚低。

责任作者简介:何晶晶,男,博士,教授,博士生导师。目前主要从事固体废物处理与资源化利用方面的研究工作。
E-mail solidwaste@mail.tongji.edu.cn

参考文献 (References):

Barlaz M A, Rooker A P, Kjeldsen P, *et al*. 2002. Critical evaluation of factors required to terminate the postclosure monitoring period at solid waste land fill[J]. *Environmental Science and Technology*, 36(16): 3457—3464

Berge N D, Reinhart D R, Townsend T G. 2005. The fate of nitrogen in bioreactor landfills[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 35(4): 365—399

何晶晶,冯肃伟,邵立明. 2003. 城市固体废物管理[M]. 北京: 科学出版社, 55

He P J, Feng S W, Shao L M. 2003. Municipal Solid Waste Management[M]. Beijing: Science Press 55 (in Chinese)

Onay T T, Pohland F G. 1998. In-situ nitrogen management in controlled bioreactor landfills[J]. *Water Research* 32(5): 1383—1392

Prantl R, Tesar M, Huber-Humer M, *et al*. 2006. Changes in carbon and nitrogen pool during in-situ aeration of old landfills under varying conditions[J]. *Waste Management* 26(4): 373—380

Price G A, Barlaz M A, Hater G R. 2003. Nitrogen management in bioreactor landfills[J]. *Waste Management* 23(7): 675—688

Shao L M, He P J, Li G J. 2008. In situ nitrogen removal from leachate by bioreactor landfill with limited aeration[J]. *Waste Management* 28(6): 1000—1007

国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会编. 2002. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 211—213, 250—251, 279—280, 282—283

State Environmental Protection Administration of China. 2002. Methods for Monitor and Analysis of Water and Wastewater 4th ed [M]. Beijing: China Environmental Science Press 211—213, 250—251, 279—280, 282—283 (in Chinese)

于晓华,何晶晶,邵立明,等. 2004. 填埋层空气状况对渗滤液中氮成分变化的影响[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 32(6): 741—744

Yu X H, He P J, Shao L M, *et al*. 2004. Effect on Nitrogen Component in Leachate under Different Air Conditions in Landfill Layers[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 32(6): 741—744 (in Chinese)