

污泥衡敛消纳法的应用分析

赵 峰

(南阳仲水环保技术应用中心, 河南南阳 473000)

摘要: 主要从理论模型上研究了污泥衡敛消纳法的实际应用, 发现污泥在达到充分消化之后的时间是污泥消化降解率的最大化, 同时也是污泥的增量最小化的时期。通过对污泥衡敛消纳法进行理论分析, 指出其需要加强的技术要点, 得出结论, 污泥消纳法为解决污泥问题提供了新的思路。

关键词: 环境工程学; 污泥处理; 衡敛; 消纳; 数学模型;

中图分类号: X505 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2010)12-2512-5

Application analysis on sludge digestion and storage method

ZHAO Feng

(Nanyang Zhongshui Environmental Protection Technology Application
Center, Nanyang, Henan 473000, China)

Abstract: The paper studies practical application of sludge digestion and storage method based on theoretical model, and finds that after complete digestion of the sludge the maximum sludge digestion rate and minimum sludge increase quantity are achieved. The paper theoretically analyzes the sludge digestion and storage method, points out the key technical points, and draws the conclusion that the method provides a new way for solving the sludge disposal problem.

Key words: environmental engineering; sludge disposal; constant convergence; digestion and storage; mathematic model

0 引言

污泥是污水处理的副产物。在我国, 随着污水排放量、污水处理率的逐步提高, 污泥的产量也同步增加, 如果不能有效处置污泥, 将会给环境带来越来越大的压力。常规的做法是通过额外设计处置措施对污泥进行处置, 通用的方法有卫生填埋、土地利用、焚烧等, 但是都存在一些不利因素。污泥在卫生填埋处理时, 除了要考虑城市周围是否有适合填埋的低地或谷地之外, 还应考虑到环境卫生问题, 焚烧成本高并能产生二次污染, 污泥土地的利用原则是施用污泥中的有害成分不能超过受施土壤的环境容量, 土地利用前需经过无害化的预处理^[1]。污泥降解过程具有衰减性, 开放系统状态具有衡敛的属性^[2]。所谓污泥衡敛消纳法是依据系统状态具有衡敛性的原理, 在污泥衡敛数学模式基础上建立起来的, 具有污泥处理与污泥处置的系统性方法。

1 污泥衡敛消纳法简介

污泥处理中存在有机物降解的过程, 有机物降解的衰减性具有收敛特性, 符合约束性开放系统中衡敛性的条件, 即污泥处理系统存在相应的污泥状态衡敛值 O , 在一定边界条件下, 污泥衡敛值是一个收敛的特定值, 对应达到衡敛值的时间是衡敛时间 λ 。

污泥衡敛消纳法是根据污泥系统的衡敛性而形成的污泥消化和存纳方法, 污泥消纳的意思是污泥的消化和存纳。

污泥衡敛消纳法的技术是指在一个污泥处理设施中, 污泥的有效容积至少满足大于衡敛值所需容

积，当污泥处理设施运行在污泥降解的停留时间大于衡敛时间时，设施中的污泥增量处于最低状态，污泥处理系统运行在污泥的充分消化和存纳状态，这种具有污泥消纳作用的设施称为污泥消纳池。

污泥消纳池的主要功能体现在实现污泥消化和存纳所实现的减容、减量、稳定化、无害化，且能够为污泥资源化利用创造便于控制和管理的工作条件。

污泥衡敛消纳法所指的消化是以水解、发酵、厌氧消化为主的降解有机物及污泥的方法；污泥衡敛消纳法所指的存纳是消纳池具有长期存纳污泥的有效容积和条件。

凡是具有污泥消解作用并且能够存纳污泥的污泥处理设施都可作为污泥消纳设施。

2 污泥衡敛消纳法的理论分析

2.1 分析方法

污泥衡敛消纳法的理论分析采用数学模式分析的方法，主要是对污泥处理系统状态的衡敛数学模型进行分析的方法。

根据开放系统的衡敛方程^[2]，污泥系统的状态模型为

$$S_t = F_b \cdot (t \cdot M_0^+ + \alpha \cdot O), \quad (1)$$

其中， S_t 为消纳池中 t 时的未降解有机物（污泥）量； t 为污泥消化处理时间（d）； M_0^+ 为单位时间输入污泥中难降解部分的量（kg/d）； O 为对应污泥系统的状态衡敛值； α 为衡敛系数， $0 \leq \alpha \leq 1$ ； F_b 为系统的边界条件干扰作用。

2.2 污泥状态分析

有机物（污泥）中易降解有机物完全降解所需时间为衡敛时间 λ ，污泥消纳池主要是指污泥停留时间大于衡敛时间 λ 的设施，设消纳池的污泥输入稳定。

污泥消纳系统的状态模型为

$$S_t = F_b \cdot (t \cdot M_0^+ + \alpha \cdot O).$$

在基本状态下，污泥系统存在基础性边界条件， F_b 取值为 1，基础条件下污泥消纳衡敛状态的数学模型为

$$S_t = t \cdot M_0^+ + \alpha \cdot O. \quad (2)$$

系统衡敛系数 α 的最大值为 1，消纳池污泥消纳所需的时间长。式 (2) 中，当 $t \geq \lambda$ 时，则 $\alpha = 1$ ，那么，污泥消纳池中污泥状态的数学模型表达为

$$S_t = t \cdot M_0^+ + O. \quad (3)$$

2.2.1 污泥理想状态的分析

理想情况下，污泥为易降解污泥，当 $t \geq \lambda$ 时完全降解，即

$$M_0^+ = 0. \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3)，则

$$S_t = O. \quad (5)$$

由此得出：在忽略边界条件干扰的理想条件下，污泥完全降解情况时，当污泥消化处理时间不小于衡敛时间 λ 时，消纳池中的 S_t 保持恒定且等于衡敛值 O ，消纳池中的污泥量不随输入污泥时间的延长而增加，消纳池中的污泥量就处于零增长状态。

2.2.2 污泥常规状态的分析

在现实中，一般情况下，污泥成分复杂，包含易降解有机物、难降解有机物、不溶性无机物等，

可将易降解有机物看作易降解污泥，难降解有机物和不溶性无机物都看作难降解污泥 M_0^+ ，那么在基本状态时，消纳池中污泥的状态表达式为

$$S_t = t \cdot M_0^+ + O,$$

其中， O 为污泥消化的衡敛值，是一个恒定值，那么在消纳池中，当 $t > \lambda$ 时，

$$ds = S_t - S_{t-1}, \quad (6)$$

其中， ds 为消纳池中单位时间污泥增量。

将式(3)代入式(6)，则

$$ds = M_0^+. \quad (7)$$

由式(7)可知：当达到污泥消纳的状态，污泥消化停留时间大于污泥的衡敛时间，则污泥中易降解污泥实现零增长，消纳池中的增量污泥仅是难降解污泥的线性增加，单位时间污泥增量 M_0^+ 。

污泥处理系统的状态还存在一种情况，随着时间的延长，难降解污泥中的部分难降解有机物在某一时间逐步开始降解，成为可降解有机物，并在时间 λ' 完全降解。在这种情况下有2种处理方法：

1) 当衡敛时间 λ 可测、 λ' 不可测时，依据设计中最不利条件的原则，忽略 λ' 进行设计计算；

2) 当 λ, λ' 都可测时，根据可计算的条件，利用收敛级数的性质，进行收敛级数的结构分解计算，用2个收敛级数的和表达污泥处理系统的衡敛值。

难降解污泥是污泥处理系统中相对稳定的成分，当 $t \geq \lambda$ 时，在污泥消纳池中可以充分实现污泥的稳定化、污泥增量的最小化。

2.2.3 消纳阶段污泥的降解分析

设单位时间的污泥输入为 M_0 ，那么在 $t \geq \lambda$ 时，

$$S'_t = t \cdot M_0 - t \cdot M_0^+ - O = t \cdot (M_0 - M_0^+) - O, \quad (8)$$

其中， S'_t 为设施中经过 t 时已经降解的有机物(污泥)总量。

$$ds' = S'_t - S'_{t-1}, \quad (9)$$

其中， ds' 为单位时间降解消化有机物(污泥)量。

将式(8)代入式(9)，则

$$ds' = M_0 - M_0^+. \quad (10)$$

由式(10)可得到，在 $t \geq \lambda$ 时，除了难降解污泥 M_0^+ ，污泥中的有机物(污泥)都得到充分消化，降解程度最大化。

2.2.4 边界条件的干扰影响

对于污泥处理的衡敛系统， $\alpha=1$ 时，且在基础边界条件， $F_b=1$ ，衡敛状态方程为

$$S_t = t \cdot M_0^+ + O;$$

当发生边界条件干扰时，衡敛状态方程为

$$S_t = F_b \cdot (t \cdot M_0^+ + O). \quad (11)$$

污泥消纳法主要建立在污泥厌氧消化的基础上，厌氧消化的影响因素有温度、pH值与酸碱度、搅拌、碳氮比、有毒物质等^[3]，当边界条件变化时，则影响了衡敛值 O 和难降解污泥 M_0^+ 。

由式(7)、式(10)可以得到：在边界条件干扰的情况下，若 M_0^+ 减小，则增量污泥 ds 减小，污泥消化的 ds' 增大。

因此，在消纳池有污泥减量、减容的进一步需求时，可通过边界条件干扰的途径，提高有机物的降解速率，缩短衡敛时间，改变污泥的可降解程度，降低难降解污泥 M_0^+ 的数值等多种形式实现。

3 对污泥进行存纳处理的意义

在污泥消化处理过程中，当 $t \geq \lambda$ 时， $\alpha=1$ ，污泥中的可降解有机物得到完全降解，相当于污泥达到最大可降解程度；对于 $t \geq \lambda$ 情况下的继续输入污泥来说，达到了该系统条件下最大的污泥减量化和稳定化。

从分析存纳意义的角度对消化池中污泥达到衡敛值后的存纳情况进行分析。

1) 在污泥都是可降解污泥的理想情况下，当 $t > \lambda$ 时， $S_t=0$ ，代入式 (6)，则 $d_s=0$ 。

由于消化池中的污泥增量为零，所以不需要排出污泥，在边界条件稳定的情况下，消化池具有恒定的污泥容积，理论上可以不考虑排泥问题。

2) 在污泥既有可降解污泥又有难降解污泥的情况下，当 $t > \lambda$ 时， $S_t=t \cdot M_0^+ + 0$ ，则 $d_s=M_0^+$ 。

由于存在增量污泥 M_0^+ ，所以反应池中污泥量会逐步增加，达到一定程度就需要进行排泥。在传统处置时，外排污泥中的挥发性可降解污泥含量高，则污泥的脱水性相对差，含水率相对高，同时可降解污泥是污泥消化的有益成分，可降解污泥的排出是一种无效的浪费。因此，理想的情况是避免无效的排放工作，反应器排出的污泥中应尽量少含可降解有机物，尽量以难降解污泥为主要排放物，这里就涉及了不同成分污泥的分离问题。

当污泥处理系统中达到污泥衡敛值 0 的情况下，污泥一般处于混合状态，难降解污泥与可降解污泥混合在一起，如果难降解污泥没有足够的沉积，就难以把难降解污泥与可降解污泥进行分离。

要分离不同成分的污泥就需要有足够污泥量实现分层，对于难降解污泥比例少的污泥，短时间里能够累积的污泥量有限，不利于污泥分离，需要较长的时间进行沉积污泥的累积，尽量争取实现沉积污泥与可降解污泥的分离，通过延长污泥的停留时间进行存纳就是实现污泥累积的有效方法。

延长污泥停留时间的污泥存纳方法还具有污泥浓缩的作用，减少了对消纳设施中污泥有效容积空间的占用，对于外排污泥来说，也具有减容的效果。

污泥中的可降解污泥与难降解污泥是相对而言的，随着消化时间的延长，部分难降解污泥有可能逐步具有可降解性，即通过延长时间的方法减小了 M_0^+ ，从而进一步促进减量。

在污泥存纳的情况下延长了污泥停留时间，当衰亡的污泥细胞解体，溶胞作用也有利于进一步实现污泥的减量。

3) 避免污泥的二次存纳

污泥进行存纳需要反应器的容积足够大，由于设施体积大，似乎是污泥存纳技术的负面因素，但是通过分析就会发现：这个影响因素并不是关键问题，因为从环保的角度看，如果污泥不存纳于消纳池内，就需要找到一个其他的存纳条件，在污泥消纳池中是一次存纳，另外找到一个存纳环境是一个二次存纳的新问题，可能会面临投资费用、场地、运输、环评等更多问题，而消纳设施则具有消化和存纳的双重作用。

消纳的路线避免了污泥存纳问题的扩散化，便于集中管理，通过污泥存纳对污泥进行有序管理，当存在进一步处置需求的时候，工作条件也有利于污泥的最终处置。

以化粪池为例，化粪池能够使污水中有机物分解酸性发酵成为消化污泥，一般不少于 90 d^[4]，由于化粪池没有考虑污泥的存纳，我国的化粪池设计清掏周期一般按 90, 180, 360 d^[5] 设计，清掏周期短、清掏频繁，浪费大量人力财力，外运的污泥还有二次污染的隐患。由此可见，污泥是否存纳对于污泥处理处置有影响。

4) 污泥处置的可持续性

在理想条件下，当达到衡敛消纳阶段，将式 (5) 代入式 (6)，得出 $d_s=0$ 。也就意味着， $d_s=0$ 的情况下，污泥系统的增量为零，污泥处理系统进入稳定工作状态，实现 $d_s=0$ 的可持续工作状态才应

该是污泥处理和处置的目标。 $d_s=0$ 的可持续工作状态包含了2种形式,一种是上述的理想状态,污泥的增量为零;另一种形式是指增量污泥与输出污泥相当而形成的零增量。因此,从技术的角度能够实现2种形式的污泥增量为零,污泥处理与处置就可以实现可持续的工作状态,就不会对环境造成新的压力。

综上所述,对充分消化后的污泥进行存纳,对于污泥的减量化、稳定化、无害化、减容是有意义和必要的。

4 有待加强的技术要点

1) 生物进行新陈代谢、分解代谢与合成代谢实质就是以C—C的形成与断裂为基础的反应过程^[6],衰老是生命的普遍现象,发生在生态系统、群落、种群、个体、细胞以及分子等不同层次。细胞体死亡后,细胞壁膜解体,细胞内容物质流出,溶出的细胞物质可为其他细胞提供代谢物质。由于污泥停留时间延长及环境条件等因素,改变了沉积污泥的正常生态环境,污泥作为一种新陈代谢有机体,污泥中的微生物在逻辑上存在衰亡衰减的因素,由于对于衰亡过程污泥增长机制的研究不足,也缺乏相应的文献参考,而衰亡污泥的增长问题关系到污泥的降解率、污泥增量、消纳设施的容积设计,因此对污泥长期存储消化情况下的研究是污泥消纳技术需要关注和研究的方

2) 污泥的存纳作用有利于集中管理和处置污泥,对于沉积污泥的后续处理,最优解决方案是能够以污泥资源化的形式利用,这里所涉及的有关沉积污泥的研究和相关配套处理处置技术还有待进一步完善。

5 结论

给出了污泥在达到充分消化之后的消纳阶段具有污泥减量化、稳定化、无害化的特点,从而表明通过延长污泥停留时间的污泥衡敛消纳法是一种有效的污泥处理与处置技术。相对于传统的通过二次设计附加外部技术措施进行污泥处置的技术,这种利用污泥内在状态衡敛属性而实现污泥处理与处置的方法是解决污泥问题的一种新思路。

[参考文献] (References)

- [1] 马娜,陈玲,熊飞,等.我国城市污泥的处置与利用[J].生态环境,2003,12(1):92-95.
MA N, CHEN L, XIONG F. Disposal and reuse of city sludge in China[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 92-95. (in Chinese)
- [2] 赵峰.开放系统状态的收敛表达式[OL]. [2010-11-23]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/confent/201011-526>
ZHAO F. The convergence of open expression of the system state[OL]. [2010-11-23]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/confent/201011-526>. (in Chinese)
- [3] 张自杰.排水工程(下册)[M].北京:中国建筑工业出版社,1987.
ZHANG Z J. Drainage works (Part II)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1987. (in Chinese)
- [4] 太原工业大学.室内给水排水工程(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,1986
Taiyuan Polytechnic College. Water supply and sewerage work (2nd Edition)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1986. (in Chinese)
- [5] 03S702.国家建筑标准设计图集[S].北京:中国计划出版社,2006.
03S702. Atlas of the state building standard design[S]. Beijing: China's Planning Press, 2006. (in Chinese)
- [6] 王镜岩,朱圣庚,徐长法.生物化学(下册)[M].北京:高等教育出版社,2007.
WANG J Y, ZHU S G, XU C F. Biochemistry (Part II)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)