

填埋场封场后的次沉降计算

Calculation of post-closure settlement of landfills

柯瀚, 陈云敏

(浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 探讨了封场后填埋场的沉降机理以及填埋体中有机质的降解规律, 提出了在分析填埋场封场后的沉降时应单独考虑由于填埋体降解引起的体积减少的观点。提出了分析有机质降解引起的沉降的理论模型, 并利用该模型解释了实测中出现的在次压缩后期沉降对数曲线斜率增大的现象。在理想条件下, 填埋场的降解沉降为最终降解沉降和一衰减项的乘积。填埋场的最终降解沉降率取决于填埋体的可降解有机质含量和一无量纲数 M , 其物理含义为降解速率与填埋时间的乘积; 而衰减项则是填埋体降解速率和时间的函数。

关键词: 填埋场; 降解; 次沉降

中图分类号: X 705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)06-0742-05

作者简介: 柯瀚(1975-), 男, 2002年在浙江大学获博士学位, 现为浙江大学岩土工程研究所讲师, 从事环境土工和土动力学方面的研究工作。

KE Han, CHEN Yur-min

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The settlement mechanism of post-closure landfills and the decomposition rule of organic carbon for MSW are discussed in this paper. The opinion that the settlement induced by biodegradation should be considered separately is put forward. A model of analyzing the biodegradation settlement is presented and is utilized to explain the increase of slope of settlement- $\log t$ curves observed in situ. It is concluded that under ideal circumstance, the biodegradation settlement can be expressed as a product of final biodegradation settlement and an attenuation factor. The final biodegradation settlement rate is determined by the content of biodegradable organic carbon and a dimensionless parameter, which is the product of biodegradation rate and filling time. The attenuation factor, is determined by the biodegradation rate and time.

Key words: landfills; decomposition; secondary settlement

0 引言*

由于封顶后沉降及不均匀沉降直接影响到填埋场地的再利用, 所以一直以来深受工程师和研究人员的关注^[4]。Sowers^[5]是第一个为填埋体的次压缩提出模型进行分析的学者。其公式是对 Buisman^[6]的土的次压缩的理论的修正, 该理论认为土体的次压缩沉降与时间成对数关系。即

$$S_s = H_p C_{ae} \lg\left(\frac{t}{t_p}\right), \quad (1)$$

式中 H_p 为土层主固结完成后的厚度(高度); C_{ae} 为修正次压缩指数, $C_{ae} = \frac{C_a}{1+e_p}$; C_a 为次压缩指数; e_p 为主固结完成时土体的孔隙比; t_p 为次压缩开始时间(一般取1个月); t 为填埋场封场后时间。

Sowers^[5]通过研究认为填埋体次压缩指数 C_a 与 e_p 大致成线性关系。他同时还给出了 C_a 的估算范围:

$$C_a = (0.03 \sim 0.09) e_p. \quad (2)$$

其中 0.03 对应于不利于生物降解时的条件, 而 0.09 对应于利于生物降解时的条件。

上述分析方法存在下列问题: ①由于填埋场的堆载时间很长, 特别是考虑到当填埋场封场时其底部的填埋体有机质的分解可能已接近尾声, 所以将深层填埋体和上部的新鲜垃圾不加区别是不合理的。②一些实测结果表明, 填埋场的修正次压缩指数 C_{ae} 通常不是常量, 经过一段时间后, 填埋场的沉降与时间对数曲线的斜率会出现比较明显的增长^[1]。

由于垃圾土的性质不稳定, 除了采用传统的固结和次固结理论外, 许多人认为应当建立经验公式^[7, 11, 12]来估算垃圾土的次压缩沉降。但这类方法需要对封场填埋场较长时间的观测, 难以用于直接的预测。

1 填埋场沉降机理及填埋体有机质降

填埋体的沉降机理非常复杂, 主要有^[1, 2] ①物理压缩; ②错动; ③流变和固结; ④物理化学变化; ⑤有机物的生化分解。

和一般土体相比, 填埋体沉降的一个显著特征为由于物理化学变化以及生化分解(后文统称为“降解”)

引起的沉降在填埋场封场后的沉降中占有相当大的比例。有机质的降解过程如下: 有机质溶解, 通过甲烷生成作用产生甲烷, 最后转变为二氧化碳。由于填埋体中绝大部分是不可溶解的, 所以从总体上说, 有机质的降解速度由水解作用决定^[13]。许多学者^[8, 10]验证了有机质水解作用过程可由下式表示:

$$M_c(t) = M_c(0) \cdot e^{-kt}, \quad (3)$$

式中 $M_c(t)$ 为 t 时刻有机质质量(kg); $M_c(0)$ 为初始时刻有机质含量(kg); t 为填埋时间(a); k 为有机物降解速率, 与垃圾的含水率、填埋方式、温度等条件有关。Chen^[8]认为降解速率介于 $0.012 \sim 0.788a^{-1}$ 之间。

目前国内外采用高温分解的方法测得有机质含量(the total volatile solid)在自然条件下并不能被完全分解。若假设 MSW 初始有机质质量百分含量为 B_0 , 其中可降解质量百分含量为 B_1 , 则 $B_1 = \alpha B_0$, α 为小于 1 的常数。Golueke^[9]通过研究认为, α 呈正态分布, 其平均值为 0.56。

在填埋期间及刚封场时, 如果填埋速率为 v (m/a), 则填埋场内某深度 z 处 MSW 的填埋时间为 z/v 。有机质质量百分含量 $B(z)$ 与深度 z 的关系为^[3]

$$B(z) = \frac{(1 - \alpha + \alpha e^{-\frac{kz}{v}}) B_0}{1 - \alpha B_0(1 - e^{-\frac{kz}{v}})} \quad (4)$$

在一维压缩的情况下, 本文假定由于有机质的降解引起的沉降与填埋体高度的比值等于已降解物质的质量与填埋体总的固体质量的比值(本文不考虑有机质降解引起的平均颗粒密度的改变)。并将这部分体积的减少(固体本身的减少与由此引起的孔隙的减少)定义为“降解沉降”, 它与已降解物质的质量成正比。同时, 本文将除此以外的次压缩沉降, 归因于填埋体在应力等因素作用下引起的沉降, 并称为“应力沉降”。

如果忽略次压缩过程中填埋体孔隙比的改变(可以证明, 这一因素对填埋体的降解沉降影响很小), 则对一初始可降解有机质质量百分含量为 B_1 、厚度为 Δh 的填埋体, 其降解沉降随时间的变化可以采用下式表示:

$$S_b(t) = B_1 \Delta h (1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

图 1 给出了 k 分别等于 $0.012a^{-1}$ 、 $0.1a^{-1}$ 和 $0.788a^{-1}$ 时 $S_b(t)/(B_1 \Delta h)$ 随对数时间的变化曲线。从图中可以发现, 当 k 等于 $0.1a^{-1}$ 时, $S_b(t)/(B_1 \Delta h)$ 在开始阶段增加很慢, 过了 1a 左右的时间后, 其随对数时间的斜率突然增加并接近线性增长, 这和实测的沉降曲线的增长方式非常一致。对于 k 等于 $0.012a^{-1}$ 和 $0.788a^{-1}$ 的情况, 同样有这一现象的发生, 只是随着

k 的减小, 转折点的时间相应推迟。

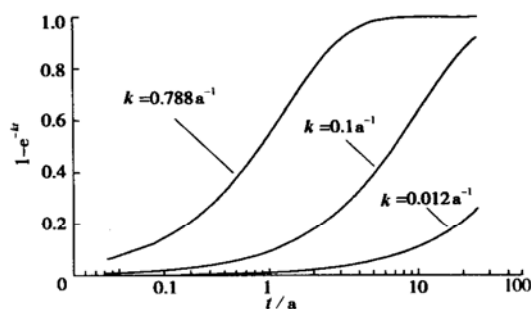


图 1 降解沉降比随对数时间的变化

Fig. 1 Variation of decomposition settlement with logarithm time

2 填埋场沉降分析方法

根据前文的分析, 笔者将填埋场的次压缩沉降分为两部分: 降解沉降和应力沉降。即

$$S = S_s + S_b, \quad (6)$$

式中 S 为总次压缩沉降; S_s 为次应力沉降; S_b 为降解沉降。

对于应力沉降, 虽然从填埋体的堆载时间和上覆荷载的角度来看, 不同深度的填埋体应该处于不同应力作用过程的不同阶段, 但据笔者所知, 目前尚没有可靠的模型定量描述这一次压缩过程。故笔者仍然采用传统的计算次压缩方法。即

$$S_s = H_p C_{sae} \lg(t/t_p), \quad (7)$$

式中 H_p 为土层主固结完成后的厚度(高度); t_p 为次压缩开始时间(从封场时开始计算, 一般取 1 个月); t 为填埋场封场后时间; C_{sae} 为修正应力压缩指数, $C_{sae} = C_{sa}/(1 + e_n)$; C_{sa} 为应力压缩指数。

虽然从形式上看, 式(7)和式(1)相同, 但式(7)计算的只是应力沉降部分。所以应力次压缩指数应接近填埋体次压缩指数的下限值, 在没有实测值的情况下, 笔者建议 C_{sa} 的估算范围如下所示:

$$C_{sa} = (0.02 \sim 0.04) e_p. \quad (8)$$

为了计算降解沉降, 笔者采用下列假定: ①填埋体为均质的垂直堆体, 压缩过程中侧向限制; ②填埋体的堆载速度不随时间发生变化; ③有机物生物降解速率 k 为常数。

如果填埋场的平均填埋速率为 v (m/a), 对一处于深度 z 的填埋体微单元, 如果将填埋场封场时作为 0 时刻, 则其可降解的质量百分含量 $B_1(z, 0)$ 如下式所示:

$$B_1(z, 0) = \frac{B_1 e^{-\frac{kz}{v}}}{1 - B_1(1 - e^{-\frac{kz}{v}})} = \frac{B_0 \alpha e^{-\frac{kz}{v}}}{1 - \alpha B_0(1 - e^{-\frac{kz}{v}})}, \quad (9)$$

其中参数和式(4)相同。

根据假定②上述质量百分含量同时也是有机质占固体体积的百分含量。则微元体的体积构成为可降解物质 $B_1(z, 0)$, 不可降解物质 $1 - B_1(z, 0)$, 孔隙 $e(z)$ 。

经过 t 时间后, 微元体的体积构成为可降解物质 $B_1(z, 0)e^{-kt}$, 其他物质 $1 - B_1(z, 0)$, 孔隙 $e(z)[1 - B_1(z, 0)(1 - e^{-kt})]$ 。

则微元体的体积变化如下式所示:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{B_1(z, 0)(1 - e^{-kt}) + e(z)B_1(z, 0)(1 - e^{-kt})}{1 + e(z)} = B_1(z, 0)(1 - e^{-kt}) \quad (10)$$

在侧限条件下, 对一封场高度为 H_0 的填埋场, 其降解沉降可用下式表示:

$$S_b = \int_0^{H_0} B_1(z, 0)(1 - e^{-kt}) dz = -\frac{v}{k} \ln |1 - B_1(1 - e^{-\frac{kH_0}{v}})| (1 - e^{-kt}) = S_{b\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (11)$$

其中 $S_{b\infty} = -\frac{v}{k} \ln |1 - B_1(1 - e^{-\frac{kH_0}{v}})|$, 为最终的降解沉降。

在这里可以引入一个无量纲数 $M = \frac{kH_0}{v}$, 其含义为降解速率与总填埋时间的乘积。则最终降解沉降 $S_{b\infty}$ 与填埋场封场时高度 H_0 的比值(后简称降解沉降比)可以用下式表示:

$$\frac{S_{b\infty}}{H_0} = -\frac{1}{M} \ln |1 - B_1(1 - e^{-M})| \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 填埋场的降解沉降比仅取决于填埋体的初始可降解有机质含量 B_1 和无量纲数 M 。为了进一步考察这两个因素对降解沉降比的影响, 图2和图3分别给出了最终降解沉降比随无量纲数 M (对数)和可降解有机质含量 B_1 的变化。由于降解速率 k 基本上在 $0.05a^{-1} \sim 0.5a^{-1}$ 的范围内, 假定填埋时间在 2 a 到 20 a 之间, 则 M 值主要落在 0.1~10 之间; 可降解有机质含量 B_1 的范围大致在 0.1~0.3 之间, 与之相对应的有机质含量介于 17.9%~53.6% ($\alpha = 0.56^{[9]}$) 之间。

从图2中可以看出, 随着无量纲数 M 的增加, 最终降解沉降比随之减少。 M 值在 1.0 附近为敏感区域, 其值的改变对最终降解沉降比影响很大, 而在远离 1.0 的区域则变化相对平缓, 对最终降解沉降比影响较小。当 M 值趋向于 0 时, 填埋场的最终沉降趋向于极限值 B_1H_0 。当 M 值趋向于无穷大时, 在填埋场封

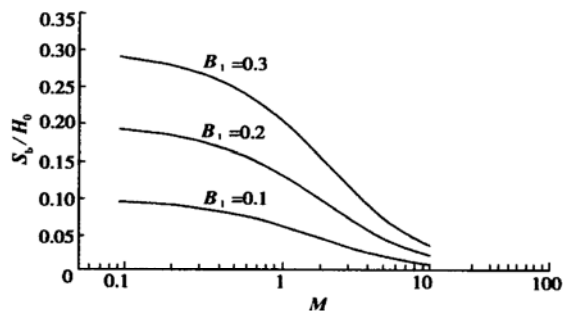


图2 最终降解沉降比随无量纲数 M 的变化

Fig. 2 Variation of final decomposition settlement rate with M

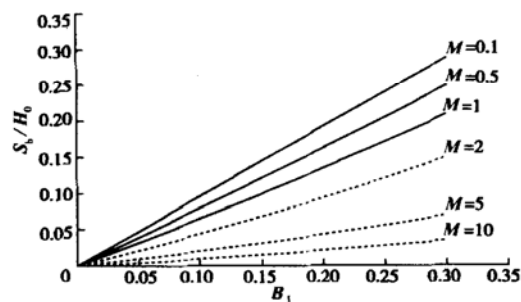


图3 最终降解沉降比随可降解有机质含量的变化

Fig. 3 Variation of final decomposition settlement rate with decayable organic content

场后降解趋向于 0。

根据图3, 在通常的范围内 ($M(0.1 \sim 10)$, $B_1(0.1 \sim 0.3)$), 最终降解沉降比与有机质含量 B_1 大致成线性增长关系。

3 算例分析

假设一填埋高度为 50 m 的填埋场, 堆载过程为 10 a, 平均每年 5 m, $k = 0.1a^{-1}$, 初始有机质含量为 30% (可降解有机质含量为 0.168), 填埋完成时平均孔隙比为 2.0, 应力压缩指数为 0.02 e_p , 主压缩在填埋场封场后 1 个月完成。

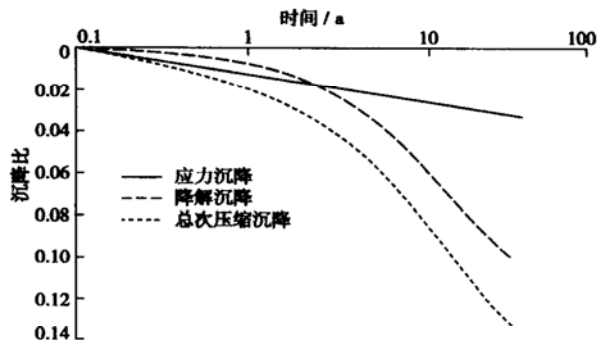


图4 填埋场的应力沉降、降解沉降和总次压缩沉降曲线

Fig. 4 Mechanical settlement, decomposition settlement and total secondary settlement curves of a landfill

图4给出了填埋体的应力沉降比、降解沉降比和总次压缩沉降比随对数时间的变化。从图中可以看

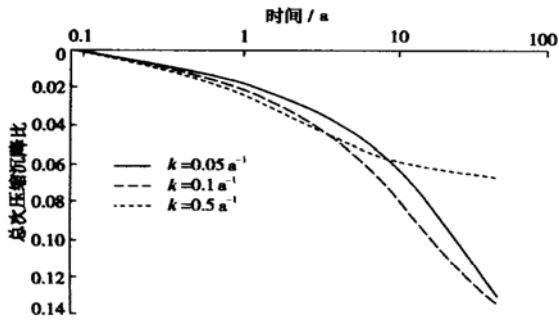


图 5 不同 k 值下填埋场的总次压缩曲线

Fig. 5 Total secondary settlement with different k value

出, 开始的时候, 总沉降基本上由应力沉降引起。随着时间的增加, 降解沉降发展加快, 逐渐赶上并超过应力沉降。在填埋结束后的短时期内(差不多 1 a 左右), 总次压缩沉降曲线的斜率相对较小; 而在后续的时期内, 其斜率有较大的增长。这和欧洲以及北美不同类型的垃圾填埋场实测沉降的对数时程曲线的特征是一致的^[1]。

图 5 给出了当 k 等于 0.05, 0.1 和 0.5 时填埋场的总次压缩曲线随对数时间的变化。与这 3 种 k 值相对应的最终降解沉降比分别为 0.137, 0.112 和 0.0365。总的来看, 降解速率大的填埋场沉降在次压缩初期更快一些, 但和公式(2)相比, 这种增长效应并不明显。笔者认为可能有下述原因: ①当 k 值增加时, 填埋场更加适宜于降解, 从而导致可降解有机质的比例增加; ②可降解物质的平均颗粒比重小于不可降解物质的平均颗粒比重; ③有机质的降解和应力压缩指数可能是正相关的; ④有机质的降解和降解沉降间可能具有滞后性。

4 与 Edil(1990) 实测算例的比较

Edil 等^[11] 分别采用了 Gibson-Lo 次压缩模型和指数蠕变模型对 4 个填埋场的实测结果进行了模拟, 发现采用指数蠕变模型能更好地拟合实测曲线。他们根据对一个填埋场的 5 个测点 1 a 的沉降观测, 预测了观测结束时(共为 1.6~1.8 a 左右)的沉降结果(见表 1 指数方法(2), 其中(2)表示 2 a 左右, 下同), 并与

实测(见表 1 指数方法(2))作了对比。对于这种有实测结果的拟合和预测, 如果采用本文的方法, 需要确定 3 个参数: 降解沉降比、降解速率和修正应力压缩指数。与前文不同的是, 此时所用的参数不再具有前文的物理含义, 但所有的参数都应处于一个合理的范围内, 以避免由于一些偶然的因素(如一些短时间内的快速沉降)导致最终的预测结果远远偏离实际。这也是本文方法和一些完全从沉降曲线的形状出发拟合和预测填埋场沉降方法(包括指数蠕变方法)相比的一大优点。

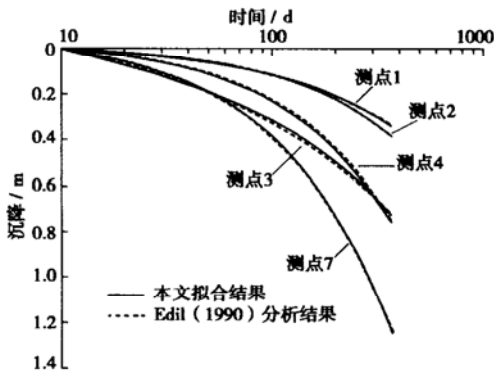


图 6 本文方法对 Edil(1990) 实测结果的拟合

Fig. 6 Simulation of the in situ measurement by Edil(1990)

由于没有实测数据, 本文根据 Edil^[11] 对 5 条沉降曲线的拟合, 作了该填埋场的拟合曲线(见图 6)和预测值(见表 1 本文方法(2))。表 1 还给出了各曲线的拟合参数。从图表中可以看出, 拟合和预测效果均比较理想。各测点的降解沉降比介于 0.115~0.260 之间。注意此时的降解沉降比还包含了应力沉降中的以指数形式衰减的分量。降解速率比较稳定, 除测点 3 外, 和降解沉降相比, 应力沉降在后期几乎可以忽略。

为了进一步比较最终预测结果, 表 1 还给出了本文方法和指数蠕变法对 20 a 后的沉降预测。从中可以看出, 指数蠕变法得到的预测结果均明显大于本文结果。虽然无法肯定哪种方法更准确, 但指数蠕变法对测点 2 和 4 的预测结果明显偏大, 其中测点 4 的压缩量已超过填埋厚度, 而采用本文方法则能避免这一结果产生。

表 1 本文方法和 Edil(1990) 指数蠕变法及实测结果的对比

Table 1 Comparison between the method in this paper and that of Edil(1990)

测点	初始厚度	实测值(2)	指数方法(2)	本文方法(2)	指数法(2)	本文法(2)	降解沉降比	降解速率	修正应力压缩指数
测点 1	13.73	0.52	0.53	0.55	2.99	1.69	0.115	0.200	0.0028
测点 2	8.01	0.59	0.59	0.58	5.33	1.99	0.243	0.205	0.0025
测点 3	9.25	1.11	1.06	1.09	3.36	2.27	0.165	0.332	0.021
测点 4	9.84	1.19	1.24	1.19	10.04	2.68	0.260	0.334	0.003
测点 5	36.28	1.88	2.00	2.00	14.59	5.68	0.15	0.24	0.002

注: 厚度及沉降单位: m, 其它同前。

5 结 论

本文将填埋场封场后的沉降分为两部分: 降解沉降和应力沉降。降解沉降定义为由于固体的分解引起的, 在不改变填埋体孔隙比的前提下的体积减少; 而将除此以外的部分定义为应力沉降。其目的在于定量描述由于降解引起的沉降及其对总的次压缩沉降的影响。

从总体上看, 本文的计算模型能够反映实测曲线的特征和量级, 特别是揭示了填埋体的降解对填埋场次压缩后期沉降对数时程曲线斜率增加所产生的影响。作为一项探索性的工作, 本文所提出理论模型和计算方法还有待于进一步的检验和改进, 笔者罗列了以下几点:

(1) 填埋体的降解速率随深度的变化。

(2) 填埋体的降解速率和可降解有机质含量之间可能存在的关系。

(3) 降解作用对应力沉降所产生的影响。

(4) 采用本文提出的模型模拟实测填埋场沉降曲线, 并和实测的可降解有机质含量以及降解速率进行对比。

参考文献:

- [1] 张丙印. 垃圾力学的基本理论和应用[A]. 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集[C]. 2002.

- [2] 钱学德, 郭志平, 施建勇, 等. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [3] Chen Yunmin, Ke Han, et al. An improved method to evaluate the settlement of landfills[A]. 17th Int Conference on Solid Waste Tech & Mgt[C]. 2001.
- [4] Wall D K, Zeiss C. Municipal landfill biodegradation and settlement[J]. J Envir Engrg. ASCE. 1995. 121(5): 457- 487.
- [5] Sowers G F. Settlement of waste disposal fills[A]. Proc 8th Int Conf Soil Mech And Found Engrg[C]. 1973. 207- 210.
- [6] Buisman A S K. Results of long duration settlement tests[A]. Proc 1st Int Conf Soil Mech[C]. 1936. 1.
- [7] Yen B C, Scanton B. Sanitary landfill settlement rates[J]. J Chemical Techol And Biotechnol, 1975, 46: 189- 208.
- [8] Chen W H. Time settlement behavior of milled refuse[D]. Evanston: Northwestern University, 1974.
- [9] Golueke C. Composting: a study of the process and its principals[M]. Emmaus: Rodaie Press, 1972.
- [10] Young A. Mathematical modeling of landfill degradation[J]. J Chemical Techol and Biotechnol, 1989, 46: 189- 208.
- [11] Edil T B, Ranguette V J, Wuellner W W. Settlement of municipal refuse[A]. Geotechnics of Waste Fills Theory and Practice[C]. Philadelphia: ASTM, 1990. 225- 239.
- [12] Hoe I Ling, Dov Leshchinsky, Yoshiyuki Mohri, Toshinori Kawabata. Estimation of municipal solid waste landfill Settlement[J]. J Geotech and Geovir Engrg, ASCE, 1998, 124(1): 21- 28.
- [13] Halvadakis C, et al. Landfill Methanogenesis[R]. Dept of Civil Engineering, Stanford University, 1983.

本刊征集论文反馈信息启事

谨向关心和支持本刊的广大读者致以深深的谢意! 由于版面和栏目所限, 有很多读者的力作, 本刊未能选用。当然在遗漏优秀成果的同时不排除可能还有部分有欠成熟的文章在本刊发表。对此本刊均向广大读者致歉! 为了改进本刊工作, 更好地为读者服务, 本刊谨向广大读者征集本刊所载论文的反馈意见:

1. 凡本刊所载论文, 取得良好社会、经济效益或有较高学术价值者, 请将有关说明材料(或复印件)寄送本刊。

2. 凡不成熟的或产生负面影响的文章, 欢迎读者以各种方式将意见反馈本部。

再次向广大读者致谢!

(本刊编辑部)