

黏土中隧道开挖引起的地表及地表以下土体长期沉降计算方法

杨敏^{1, 2}, 黄炬^{1, 2}, 孙庆^{1, 3}, 刘侃^{1, 2}, 曾英俊^{1, 4}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 中国建筑第三工程局有限公司技术中心, 湖北 武汉 430070; 4. 上海市第二市政工程有限公司, 上海 200065)

摘要: 基于 Mair 提出的隧道开挖引起的土体瞬时沉降的理论以及进行的有限元数值模拟结果, 推出地表及地表以下不同深度土体长期沉降的计算方法。首先模拟了 Ong 的离心机试验以验证数值模型的合理性, 然后对隧道开挖引起的不同深度处土体长期沉降问题进行了模拟研究, 建立了长期和瞬时情况下地层损失率之间的关系, 并推导出长期情况下各深度处沉降槽宽度系数和最大沉降值的计算式, 从而可确定沉降槽的形状。经与现场实测资料和数值模拟结果对比, 验证了方法的合理性, 可作为实际工程的借鉴。

关键词: 隧道; 地表以下; 长期沉降

中图分类号: TU434

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)02-0217-05

作者简介: 杨敏(1960-), 男, 江西南昌人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究与教学工作。

E-mail: yangmin@mail.tongji.edu.cn。

Computation method for long-term surface and subsurface settlements induced by excavation of tunnels in clays

YANG Min^{1, 2}, HUANG Ju^{1, 2}, SUN Qing^{1, 3}, LIU Kan^{1, 2}, ZENG Ying-jun^{1, 4}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Technical Center, China Construction Third Engineering Division, Co., Ltd., Wuhan 430070, China; 4. Shanghai No. 2 Municipal Engineering Co., Ltd., Shanghai 200065, China)

Abstract: Based on the Mair's theory of immediate settlement of soil due to tunneling, and the results of finite element simulation, a computation method for the long-term settlement of the soil at surface and subsurface is proposed. Ong's centrifuge test is simulated first to verify the validity of the finite element model, then a numerical study on the long-term settlement of the soil at different depths is carried out. The relationship between ground losses under immediate and long-term conditions is established. Formulas for width parameter and the maximum settlement of settlement trough at different depths are also given, and the profile of settlement trough can be determined. Compared with the field measurement and numerical simulation, the validity of the proposed method is demonstrated. It can be employed in practical projects.

Key words: tunnel; subsurface; long-term settlement

0 引言

随着大城市中地铁隧道的大量建设和投入使用, 由隧道开挖引起的土体(尤其是软黏土)沉降问题日益受到关注。对于瞬时的地表沉降问题, 实测资料较多, 理论研究也较充分, 已经能较好地与实际工程提供指导和分析; 对于地表以下土体的瞬时沉降, 实测资料较少, 理论研究方面 Mair 等^[1]和 Loganathan 等^[2]分别提出了各自的理论计算方法。而对于隧道开挖引起的土体长期沉降问题的研究, 则由于实测资料的匮

乏而受到制约, 地表以下土体长期沉降问题的研究更是少之又少。

本文基于 Mair 提出的隧道开挖引起土体(包括地表及地表以下)瞬时沉降的理论公式, 结合有限元数值模拟的结果, 提出了相应的长期沉降计算公式。

1 Mair 瞬时沉降计算方法

通常认为, 由隧道开挖引起的瞬时地表沉降槽形

状可以用高斯分布函数很好地表示为^[3]

$$S = S_{\max} \exp(-x^2/2i^2) \quad (1)$$

式中, S 为地表任意一点的沉降值, S_{\max} 为地表的沉降槽的最大沉降值, 位于隧道中心线上方, x 为任意一点距离隧道中心线的水平距离, i 为沉降槽的宽度系数, 其定义为从隧道中心线到沉降槽反弯点的水平距离。各参数的具体意义可参见图 1。

由式 (1) 可知, 要得到沉降槽的形状, 只需确定 i 和 S_{\max} 。

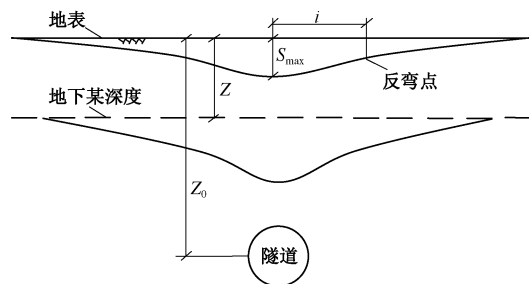


图 1 地表及地表以下土体沉降形式

Fig. 1 Form of surface and subsurface settlement profiles

对式 (1) 积分, 可得出地表沉降槽所围成的面积为

$$V_s = \sqrt{(2\pi)iS_{\max}} \quad (2)$$

定义地层损失率 V_L 为地表沉降槽围成的面积 V_s 与隧道设计横截面积的比:

$$V_L = \frac{4V_s}{\pi D^2} \quad (3)$$

式中, D 为隧道的直径。

对于瞬时 (指在隧道开挖过程中) 沉降问题, 认为黏土中隧道开挖引起的地表沉降发生在不排水条件下, 即土体本身的体积是恒定的, 因此 V_s 表示的就是开挖过程中相比隧道设计面积土体超挖部分的面积。

由式 (2)、(3) 可得出地表最大沉降值:

$$S_{\max} = 0.313V_L D^2 / i \quad (4)$$

通常可以认为地表以下某深度的沉降槽曲线也可以用类似的高斯分布函数来描述。Mair 提出, 地表以下 Z 深度处沉降槽对应的宽度系数 i 与深度近似的有如下的关系:

$$i = K(Z_0 - Z) \quad (5)$$

式中, Z_0 为隧道的埋深, 即地表到隧道中心的竖直距离。通过对离心机试验及现场实测的结果分析, Mair 进一步给出了式 (5) 中 K 的计算方法,

$$K = \frac{0.175 + 0.325(1 - Z/Z_0)}{1 - Z/Z_0} \quad (6)$$

联合式 (4) ~ (6), 可得到地表及地表以下不同深度处瞬时最大沉降值统一的计算表达式:

$$S_{\max} = \frac{0.313V_L D^2}{[0.175 + 0.325(1 - Z/Z_0)]Z_0} \quad (7)$$

2 有限元模型的建立与验证

2.1 Ong^[4]的离心机试验

Ong 曾利用离心机试验对隧道开挖引起的地表土体沉降问题进行了研究。图 2 为试验模型的示意图, 图中尺寸为原型尺寸。上层黏土为高岭土, 下垫层为砂土。黏土的主要物理参数: 液限 80%, 塑限 40%, 比重 2.65, 天然重度 16 kN/m^3 , 饱和重度 16 kN/m^3 , 固结系数 $40 \text{ m}^2/\text{year}$, 渗透系数 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, 内摩擦角 23° , 黏聚力 3 kN/m^2 , 颗粒尺寸 $3.0 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 。隧道直径 6 m , 埋深 15 m 。试验分两组, 地层损失率分别为 3% 和 6.5%。

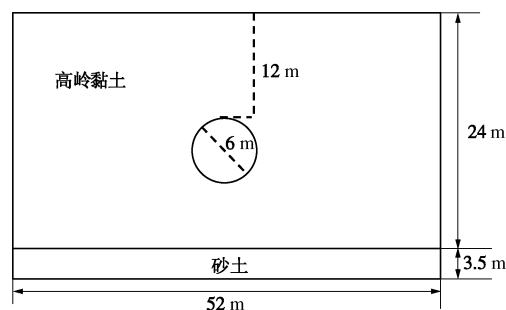


图 2 离心机模型试验示意图

Fig. 2 Configuration of centrifuge tests

2.2 数值模拟

采用 Plaxis 3D Tunnel 进行数值模拟。首先对 Ong 的离心机试验进行模拟, 对比数值模拟结果与试验结果以验证模型的正确性。所建模型尺寸完全按照 Ong 的试验, 模型及网格划分如图 3 所示。隧道衬砌假设为线弹性体, 其弹性模量 $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.2$ 。黏土层选用硬化土模型, 有关此模型参数的物理意义可参考文献[5]。此模型是一个可以模拟包括软土和硬土在内的不同类型土体行为的先进模型。在主偏量加载下, 土体的刚度下降, 同时产生了不可逆的塑性应变; 在固结排水三轴试验中, 轴向应变与偏差应力之间的关系可以很好地由双曲线来拟合; 而且考虑了土体的剪胀性并引入了一个屈服帽盖。该模型适于模拟隧道开挖条件下土体的性状。土体重度以及抗剪强度指标根据 Ong 的试验确定, 其他参数取值方法参考文献[5]。H-S 模型的具体参数: 土体天然重度 $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, 土体饱和重度 $\gamma_{\text{sat}} = 16 \text{ kN/m}^3$, 三轴排水试验割线模量 $E_{50}^{\text{ref}} = 1.25 \text{ MPa}$, 切线压缩模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 1.25 \text{ MPa}$, 卸载-再加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 3.75 \text{ MPa}$, 模量应力相关幂指数 $m = 1$, 参考应力 $p^{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$, 卸载-再加载泊松

比 $\nu=0.2$, 侧应力系数 $K_0^{\text{nc}}=0.609$, 渗透系数 $k=2 \times 10^{-8}$ m/s, 黏聚力 $c_{\text{ref}}=3$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=23^\circ$, 剪胀角 $\psi=0^\circ$ 。

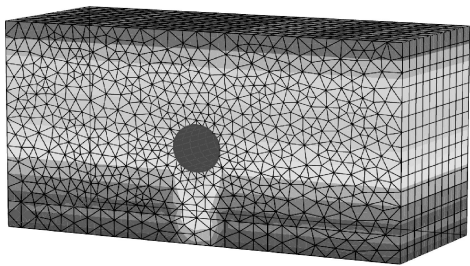


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

在不排水条件下分别进行地层损失率为3%和6.5%的隧道开挖模拟,得出地表土体的瞬时沉降。图4为数值模拟结果与离心机试验实测结果的对比。从图中可以看出,在两个地层损失率条件下两者都吻合得较好,从而验证了所建模型的合理性。

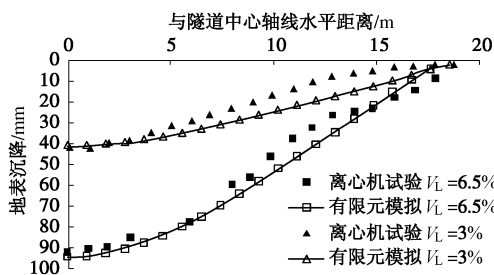


图4 离心机试验与有限元模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between centrifuge tests and finite element simulations

3 长期沉降计算方法

由张冬梅^[6]的数值分析结果可知对于长期沉降槽曲线仍然可用高斯分布函数来表示,则长期沉降的计算方法可借鉴瞬时的方法。但是必须注意,在长期和瞬时的不同情况下,地表最大沉降值 S_{max} 和宽度系数 i 发生了变化,沉降槽所围成的面积也不一样。事实上,长期情况下地表各点的沉降值变大,沉降槽围成的面积比瞬时情况下要大,若仍按式(3)来定义地层损失率,则长期情况下的地层损失率 V_L' 要大于瞬时对应的 V_L 。

因此,要得到对应于长期情况的计算公式,必须先得出长期情况下宽度系数 i 的计算式,以及建立长期和瞬时地层损失率 V_L' 与 V_L 之间的关系。

在已验证的有限元模型基础上,进行地层损失率(瞬时)分别为0.5%,1%,1.5%,2%,3%,6%的开挖模拟,开挖后进行土体的固结计算,以得到土体

的长期沉降。固结计算以超孔隙水压力作为控制标准,当超孔隙水压力完全消散,即等于0的时候结束计算,认为土体的长期沉降达到稳定。对于这样来进行土体长期沉降模拟计算的合理性,可参见文献[7],文中对土体长期沉降的产生机理进行了详细的论述。可以认为土体的长期沉降分为土体损失引起的地面沉降、主固结沉降、次固结沉降。次固结沉降量常比主固结沉降量小得多,大都可以忽略,因此本文在研究时仅考虑主固结沉降。但对极软的黏性土,如淤泥、淤泥质土,尤其是含有腐殖质等有机质时,或在孔隙比和灵敏度较大的软塑和流塑性黏土中,次固结沉降会成为总沉降量的一个主要组成部分,应给以重视。

从地表起沿深度方向每隔大约1m截取其沉降槽曲线,到10m深度为止。通过沉降槽曲线可得到宽度系数 i 。绘出宽度系数 i 与深度 Z 的关系见图5,图中 i 与 Z 都除以隧道的埋深 Z_0 。

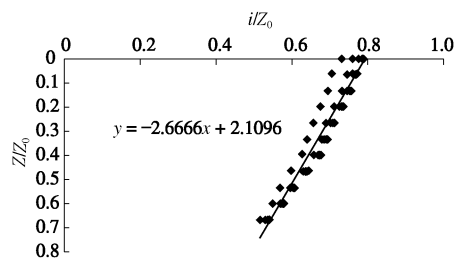


图5 沉降槽宽度系数与深度关系

Fig. 5 Relation between width parameter and depth of settlement trough

对图5的数据点进行线性拟合,可得宽度系数 i 与土体深度 Z 的关系式:

$$Z/Z_0 = -2.6666i/Z_0 + 2.1096, \quad (8)$$

由式(8)得出 i 的表达式,

$$i/Z_0 = 0.416 + 0.375(1 - Z/Z_0). \quad (9)$$

把式(9)代入到式(5),得出长期情况下 K 的表达式,

$$K = \frac{0.416 + 0.375(1 - Z/Z_0)}{1 - Z/Z_0}. \quad (10)$$

所以长期情况下不同深度处沉降槽曲线宽度系数 i 的表达式为

$$i = \frac{0.416 + 0.375(1 - Z/Z_0)}{1 - Z/Z_0}(Z_0 - Z). \quad (11)$$

对于6种不同的地层损失率,分别读取其地表沉降槽的宽度系数 i 和最大沉降值 S_{max} ,代入式(2)得到 V_s 后再代入式(3),则可得出对应于长期情况的地层损失率 V_L' 。绘出长、瞬时地层损失率之间的关系见图6。

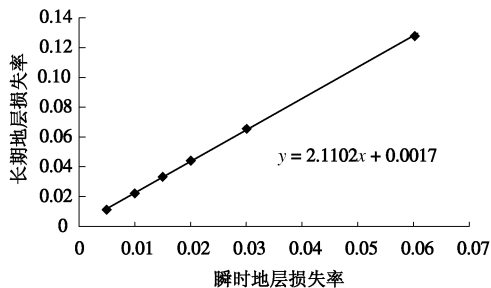


图 6 长期与瞬时地层损失率关系

Fig. 6 Relation between long-term and immediate ground losses
进行线性拟合可得

$$V'_L = 2.1102V_L + 0.0017 \quad (12)$$

联合式 (4)、(11)、(12)，可得不同深度处长期最大沉降值统一的计算表达式

$$S_{\max} = \frac{(0.66V'_L + 0.0005)D^2}{[0.416 + 0.375(1 - Z/Z_0)]Z_0} \quad (13)$$

式中， V'_L 为瞬时沉降对应的地层损失率，一般在工程中所说的地层损失率都是指瞬时沉降所对应的 V'_L 。

由式 (9)、(13) 可以看出，随着土体深度 Z 的增加，相应沉降槽的宽度系数 i 减小，最大沉降值 S_{\max} 变大，即随着深度的增加，沉降槽变窄变深。由式 (11)、(13) 可以计算出长期沉降的最大沉降值和宽度系数，代入式 (1) 即可得出长期沉降槽曲线的方程。

4 实例验算

4.1 地表长期沉降

工程中对于隧道开挖引起的土体沉降的长期监测较少，即使有也仅限于地表的监测。O'Reilly 等^[8]对 Grimsby 地区一下水道隧道开挖引起的地表沉降进行了长达 11 a (1979 年—1990 年) 的监测报告。

隧道所处的黏土层为非常软的海底淤泥，隧道直径 3 m，共在 3 个地方进行了沉降监测，分别为 A、B、C。3 处隧道的埋深为 8、5.3、6.5 m。在 A、B 两处进行了长达 11 a 的监测，发现在大约 2700 d 后沉降达到稳定；在 C 处的监测只进行了不到 1 a，监测结束时沉降还未达到稳定。

根据监测的瞬时沉降结果，算得 A、B 两处的地层损失率为 11.5% 和 4.7%，代入式 (13) 中算得 A、B 两处地表长期的最大沉降值 S_{\max} 分别为 109 mm 和 68 mm，实测值为 110、81 mm。可见用本文的方法与实测值相比在 A 处吻合得很好，在 B 处误差约为 15%。由式 (11) 算得 A、B 两处的宽度系数 i 为 6.33 m 和 4.19 m。把由本文方法算出的 S_{\max} 和 i 代入式 (1)，即可得出地表长期沉降槽曲线，如图 7 所示，实测值也绘于图上。可见用本文提出的长期沉降的计算方法得出的结果与实测值吻合得较好。

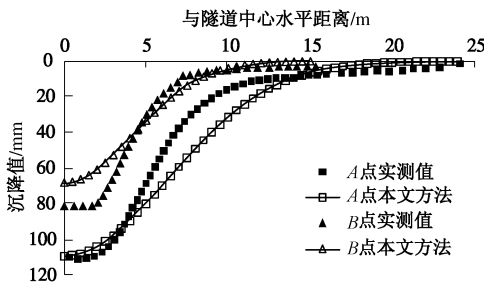


图 7 地表长期沉降槽

Fig. 7 Long-term settlement troughs at surface

4.2 地表以下长期沉降

由于缺乏对地表以下土体长期沉降的监测，这里将本文的方法与数值模拟的结果作对比。

张晨明^[9]曾对上海复兴东路隧道开挖引起的地表以下不同深度土体长期沉降进行过数值模拟。模拟的模型中，隧道直径 10.4 m，埋深 24.15 m。模拟的地层损失率为 1.46%。张晨明对不同深度 Z 处的土体长期沉降进行了模拟计算。由本文方法按式 (11)、(13) 算出代表性深度 Z 为 0、3.5、8.0 m 处长期沉降的 i 和 S_{\max} 汇总于表 1。可见随深度增加沉降槽变深变窄。

表 1 不同深度处参数

Table 1 Parameters at different depths

深度/m	宽度系数/m	最大沉降值/mm
0	19.1	57
3.5	17.8	62
8.0	16.1	68

将表 1 中的数据代入式 (1)，得出由本文方法得到的不同深度处长期沉降槽曲线，见图 8，张晨明的模拟结果也绘于图上。从图中可见，不同深度处最大沉降值本文方法与张晨明模拟的结果吻合得很好，本文方法的结果略大；而沉降槽宽度本文方法比张晨明模拟的结果要大，数值模拟的结果沉降槽半宽约为 30 m，本文方法得出的半宽约为 40 m。

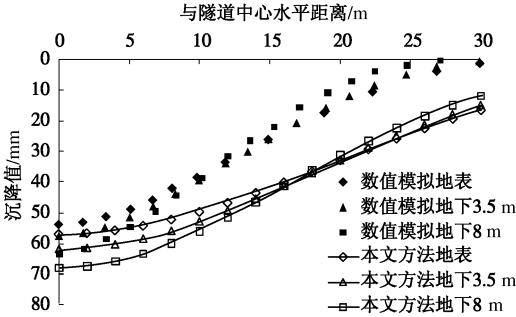


图 8 地表及地表以下长期沉降槽

Fig. 8 Long-term settlement troughs at surface and subsurface

5 结 语

对于隧道开挖引起的土体沉降问题，长期的现场

监测比较少, 所进行的长期监测也仅限于地表土体的沉降, 而不涉及地表以下土体, 因此对于长期沉降问题的研究受到限制。

本文基于 Mair 提出的瞬时沉降的计算方法, 利用有限元数值模拟的结果, 得出了地表及地表以下不同深度长期沉降槽宽度系数 i 和最大沉降值 S_{\max} 的计算式, 由此可得到各深度的长期沉降槽曲线。经与工程实测和数值模拟结果对比, 验证了本文方法的合理性。本文提出的针对隧道开挖引起土体长期沉降问题的计算方法, 可作为实际工程设计的借鉴。

参考文献:

- [1] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clay[J]. *Geotechnique*, 1993, **43**(2): 315 - 320.
- [2] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(9): 846 - 856.
- [3] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// *Proc 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Mexico City, 1969: 225 - 290.
- [4] ONG C W. Centrifuge model study of tunnel-soil-pile interaction in soft clay[D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [5] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model: formulation and verification[C]// *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Amsterdam, 1999: 281-296.
- [6] 张冬梅. 软黏土的时效分析及隧道长期沉降的预测[D]. 上海: 同济大学, 2003. (ZHANG Dong-mei. Analysis of time-dependent behavior of soft clay and its application on the prediction of long-term settlements of tunnels[D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese))
- [7] 魏 纲. 盾构施工引起地面长期沉降的理论计算研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(增刊 1): 2960 - 2966. (WEI Gang. Research on theoretical calculation of long-term ground settlement caused by shield tunneling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(S1): 2960 - 2966. (in Chinese))
- [8] O'REILLY M P, MAIR R J, ALDERMAN G H. Long-term settlements over tunnels: an eleven-year study at Grimsby[C]// *Proceedings of Conference Tunneling*. London, 1991: 55 - 64.
- [9] 张晨明. 上海地区盾构施工期及工后土体固结反应特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2005. (ZHANG Chen-ming. Immediate and long-term behavior of Shanghai clay due to shield tunneling[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))

第八届中国土工合成材料学术会议 (二号通知)

第八届中国土工合成材料学术会议定于 2012 年 5 月 23~25 日在天津召开。会议主题以“土工合成材料工程与可持续发展”为主题, 欢迎全国从事土工合成材料工程技术的专家学者、科技人员和生产企业踊跃投稿并积极参与会议, 以促进中国土工合成材料应用技术的发展和提高。会议期间将同时召开“第三届全国土工合成材料防渗排水学术研讨会”。

会议交流内容: ①土工合成材料的基本原理与特性; ②土工合成材料设计理论与标准; ③土工合成材料应用技术; ④土工合成材料施工技术; ⑤土工合成材料测试技术; ⑥自然灾害的工程措施; ⑦土工合成材料产品研发成果; ⑧土工合成材料生产工艺技术与设备改进; ⑨土工组合系统(土工管、土工袋等); ⑩国内外土工合成材料工程实例介绍。

会议包括大会和分会场专题会议两类。大会报告包括各相关行业土工合成材料应用综述, 以及针对设计、施工、研究中热点问题的特邀报告。分会场则分为加筋土、防渗与排水、测

试和环境土工 4 个专题进行交流。具体报告安排将在第三号通知给出。

本届年会论文集将由人民交通出版社正式出版。并将推荐优秀论文在《水利学报》、《岩土工程学报》和《中国港湾建设》上发表(上述期刊均为 EI 检索期刊)。为便于建设单位、设计院、施工企业和科研院所对生产企业及其产品的了解, 在本次会议论文集中会将收录土工合成材料生产企业产品名录。

重要日期: ①2011 年 10 月 1 日—2012 年 2 月 29 日论文初稿提交; ②2012 年 3 月 31 日以前论文修订稿提交; ③2012 年 2 月 29 日前企业产品名录提交。

联系人: ①周颖贤, 021-65427100-1616, 021-65178355(传真); E-mail: zhouyxsh@sina.com; ②孙 冰, 022-87898865, 022-87898865(传真), E-mail: ctag2012@163.com; ③刘天韵, 022-28343603, 022-28176143(传真), E-mail: LTY96140@163.com。

(大会组委会 供稿)