四维通量法施工扬尘排放模型的建立与应用

田刚, 黄玉虎*, 李钢
(北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要: 建立了一种与美国环保局推荐的暴露高度浓度剖面法类似、应用实测数据计算施工扬尘排放量的数学模型——四维通量法模型, 以及一套与该模型相匹配的施工扬尘排放量监测方案. 采用四维通量法计算施工扬尘排放量, 更加简洁方便, 并且可以较好地消除偶然因素对计算结果的干扰. 将北京城近郊区 40 多个建筑工地的实测数据代入该数学模型所得到的北京市施工扬尘中 TSP 排放因子为 0.492 kg/(m^2·30 d), 在数值上是美国环保局 AP-42 文件推荐排放因子的 1.83 倍. 建议采用本研究得出的本地化排放因子来建立北京市施工扬尘排放清单.

关键词: 施工扬尘; 排放因子; 四维通量; 数学模型
中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1003-05

Establishment and Application of Four-dimensional Fluxes Emission Factor Model for Construction Fugitive Dust

TIAN Gang, HUANG Yu-hu, LI Gang
(Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: We established a four-dimensional fluxes mathematics model and a suit of relevant monitoring project that can calculate construction fugitive dust emission according to actual field monitoring data, this mathematics model is similar to exposure profiling method recommended by U.S. EPA. Four-dimensional fluxes mathematics model is simpler and more convenient to calculate construction fugitive dust emission, and it can preferably eliminate the influence of incidental factors on calculation result. Actual field monitoring data from forty construction sites of Beijing were inputted into the model to calculate TSP emission factor among construction fugitive dust of Beijing local which equaled to 0.492 kg/(m^2·30 d). By comparing emission factor of Beijing and U.S. EPA's AP-42 documents, we found the ratio between Beijing's and U.S. EPA's emission factor value was 1.83. Beijing local emission factor from this paper is recommended to establish construction fugitive dust emission inventory of Beijing.

Key words: construction fugitive dust; emission factor; four-dimensional fluxes; mathematics model

施工扬尘是大气颗粒物的重要来源, 特别是目前我国经济建设高速发展, 几乎全国都成为大工地, 施工扬尘对环境空气质量的影响越来越大, 有必要进行研究和控制. 量化扬尘排放量是评价施工扬尘控制措施效果的重要手段, 目前被普遍认可的量化方法是暴露高度浓度剖面法[1,2], 该方法对道路扬尘等线源适应性较好[3], 但用于量化情况更为复杂的施工扬尘等面源时需要花费大量的时间、人力和物力, 因此采用该方法量化施工扬尘的实例鲜有报道. 为了建立扬尘排放清单, 国内各城市量化施工扬尘排放量时, 通常采用美国环保局 AP-42 文件[4,5] 推荐的排放因子, 这些排放因子只考虑了建筑工地大小对排放量的影响, 而不区分不同区域、不同时间、不同排放强度的工地[1]. 因此, 不管是量化考核施工现场扬尘控制效果, 还是制定我国各城市的扬尘排放清单, 都需要一种更为简洁有效、本地化的施工扬尘排放量计算方法.

施工扬尘根据其排放方式不同可以分为 2 类: ①一次扬尘, 施工现场内直接向大气环境排放的扬尘; ②二次扬尘, 运输车辆携带而遗洒到附近社会道路上, 由机动车激发而导致二次扬尘. 施工扬尘排放清单只包括一次扬尘, 二次扬尘被纳入道路扬尘排放清单, 本研究内容为施工扬尘中的一次扬尘.

本实验建立了一种与暴露高度浓度剖面法类似的四维通量法质量平衡模型, 以及一套与该模型相匹配的施工扬尘排放量监测方案, 结合现场实测数据定量研究北京市施工扬尘排放特征和排放因子, 该研究成果填补了国内施工扬尘排放因子本地化研究的空白, 以期为有效估算施工扬尘排放量打下坚实的基础, 为建立北京市施工扬尘排放清单提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验仪器及材料

收稿日期: 2008-05-21; 修订日期: 2008-07-11
基金项目: 环保公益性行业科研专项(200709030)
作者简介: 田刚(1954~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为无组织扬尘控制技术.
* 通讯联系人, E-mail: huangyuhu@sina.com

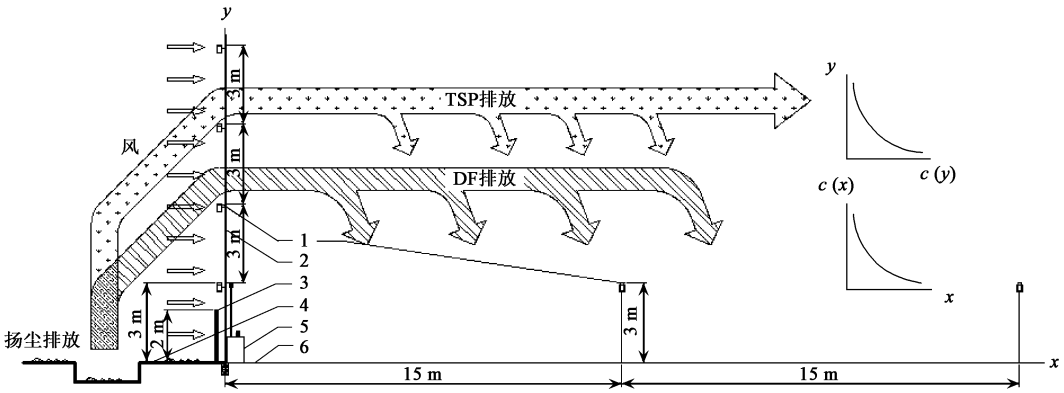
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

施工现场内的施工活动和风蚀作用会向大气环境直接排放扬尘,其中空气动力学直径(d_a)介于10~几百μm的颗粒会上下飘动,并在扬起后短时间内即沉降到工地附近地面上形成降尘(DF);而d_a介于0~100μm的颗粒则会随风飘逸,进入工地上空大气中形成总悬浮颗粒物(TSP),并且有可能随风传送到工地之外较远的距离,DF和TSP对应的颗粒物直径有重叠的部分.因此,施工一次扬尘不但会引起工地外界TSP浓度升高,而且还会引起DF浓度升高,本研究采用DF和TSP作为监测指标来表征施工扬尘污染状况.DF采样和分析程序均依照《环境空气-降尘的测定-重量法》(GB/T 15265-1994)规定执行,集尘缸材质为95号玻璃;TSP采样采用TSP-PM_{10}-Ⅱ型中流量颗粒物采样器.

1.2 实验方法

与本研究有关的施工扬尘排放监测方案包括3项实验内容,3项监测实验同步进行,分别实现不同的目标.3项实验分别为:①建设工地边界(围挡)和背景点DF平均值监测实验[6];②建设工地边界DF的垂直扩散监测实验[7];③工地边界TSP和DF同步对比监测实验[8].图1为施工扬尘排放及监测实验示意,其中右侧2个坐标图表示DF或TSP的浓度c随高度和距离变化的示意.

1.3 实验工地概况



1. 集尘缸; 2. 降尘高架采样器; 3. 工地边界围挡; 4. 建筑工地(扬尘); 5. TSP采样器; 6. 工地外界(清洁)

图1 施工扬尘排放及监测实验示意

Fig. 1 Schematic diagram of construction fugitive dust emission and monitoring experiment

排放因子代表一类排放源中很多特定排放的长期平均水平[9],因此只有足够数量的实验工地和足够长的实验时间才能保证获得质量等级高的排放因子.本研究选择北京市城近郊区大气环境监测子站周围重点区域内的建筑工地作为实验工地:①参与DF平均值实验的工地数量每月始终维持在30个以上,实验周期为12个月;②参与DF垂直扩散实验的工地为"西城区五栋大楼",实验周期为13个月;③参与TSP和DF同步实验的工地为"奥体公寓"等6个工地,实验周期为17个月.

2 结果与讨论

2.1 四维通量法模型简介

施工扬尘是典型的无组织排放源,具有污染过程复杂、排放随机性大、量化困难等特点,如何根据实测颗粒物质量浓度来计算扬尘排放量和确定排放因子是一个急需解决的重大课题.暴露高度浓度剖面法[1]采用一组同时、多点采样装置直接测量扬尘源下风向扬尘烟羽有效横截面内的颗粒物浓度和风速,然后对烟羽有效横截面内的暴露量分布做空间积分计算颗粒物通量.但是采用该方法监测施工扬尘时会存在一些局限性.①风向变化:为满足采样期间风向的变化,而去调整采样位置往往不切实际;②排放的空间分布:施工活动和排放在空间分布的不一致性要求布设更多监测点;③排放的时间分布:时间分布的不一致性要求获取不同时段的监测数据,这会给测量带来很大工作量.按照文献[10]进行施工扬尘监测同样也存在上述局限性.

本研究提出了四维通量法施工扬尘排放因子模型,并设计了满足模型要求的监测实验方案,该模型很好地继承了暴露高度浓度剖面法的优点,同时在一定程度上弥补了上述局限性.具体表现在以下3个方面:①围绕着边界四周尽可能布设多个监测点,解决了风向变化和空间分布不一致性的问题;②延长了一次监测实验的监测周期(7~30 d),解决了时间分布不一致性的问题;③同时采用DF和TSP作

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

为监测指标大大降低了实验费用.

2.2　四维通量法模型推导

由于本研究建立的模型在计算 TSP 排放量时利用了通量的概念, 同时考虑了空间(3 维) 和时间(1 维) 因素, 所以把这个模型及其实验方法命名为“四维通量法”. 四维通量法计算模型推导如下.

2.2.1　公式原形

如图 2 所示, 假设工地 ABCD 是一个正方形、扬尘均匀排放的面源. 在工地 ABCD 边界(围挡) AD 边所处的 x 轴方向上等间隔距离、相同高度 h(m) 均匀布设TSP 在线监测点. 当等速风垂直吹向 AD 边时, x 轴上 AD 段各监测点测得的 Δc_{TSP}(TSP 浓度相对背景值的增量) > 0 且相等, 其他监测点为 0; 而当等速风以一个 α 角度倾斜吹向 AD 边时, x 轴上 AG 段各监测点的浓度逐渐升高, GD 段相等, DH 段逐渐降低, 其他监测点为 0. 从图 2 可以看出 2 种情况的影响面积相等, 即正风和斜风从工地排放的扬尘量是相等的.

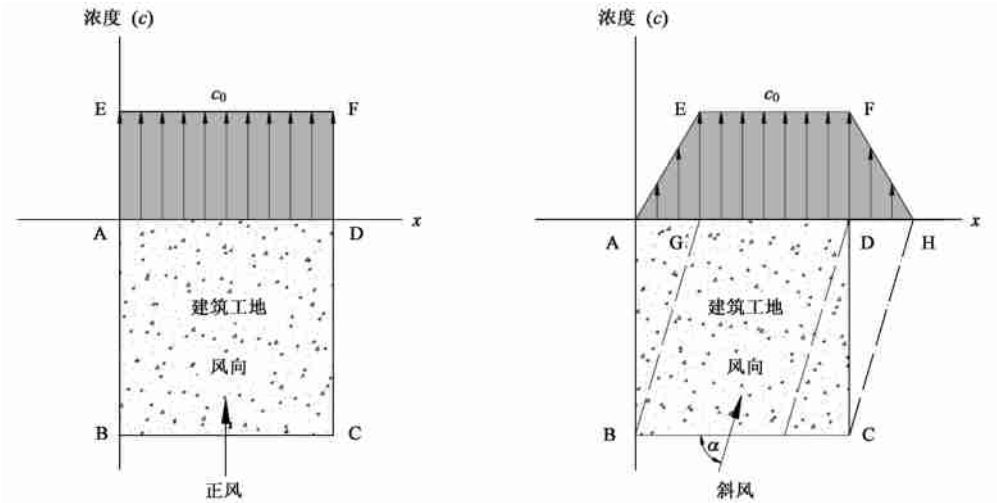


图 2　风向对工地边界颗粒物浓度的影响

Fig. 2　Influence of wind direction on PM concentration at site boundary

如图 3 所示, 在围挡正上方 h(m) 处, 当风以 $u(h, t)$ 的速度在微小时间 dt 内垂直吹向工地的 AD 边时(工地边长等于 a m), 在 h(m) 以上的微小断面 $a \times dh$ 内通过的空气量为:

$$dV(h, t) = u(h, t) \times a \times dh \times dt \qquad (1)$$

式中, h、t、$u(h, t)$、a、$dV(h, t)$ 的单位分别为: m、s、$m \cdot s^{-1}$、m、m^3.

假定此时围绕工地边界等间隔距离、在围挡正上方相同高度 h(m) 均匀布设 n 个 TSP 监测点, 则 dt 时间内只有 AD 边上监测点的 $\Delta c_{TSP} > 0$, 其他边上监测点为 0, 记 AD 边上各监测点的TSP 浓度平均增量为 $\Delta c_{TSP}(h, t)_{AD}$. 则 dt 时间内建筑工地通过微

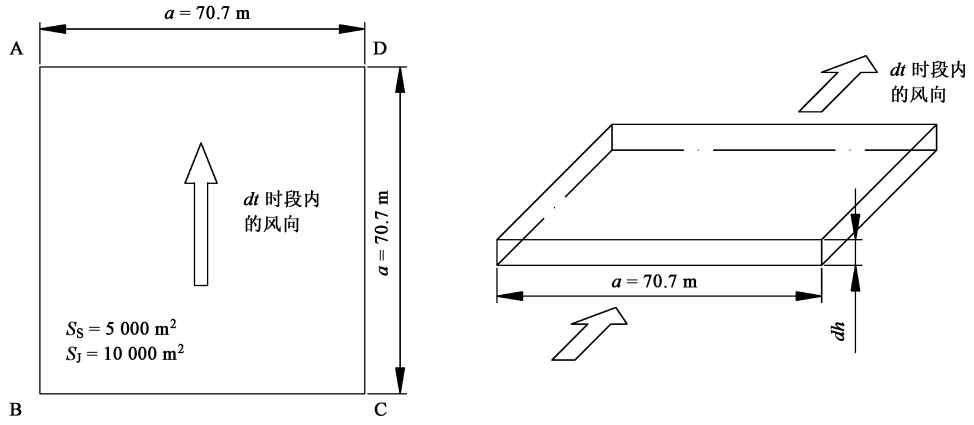


图 3　dt 时间内通过微小断面 $a \times dh$ 的空气量 $dV(h, t)$

Fig. 3　Air volume passed through a small section in small period of time

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

小断面 $a \times dh$ 向外界环境排放的TSP增量为:

$$dW_{TSP} = \Delta c_{TSP}(h,t)_{AD} \times dV(h,t) = \Delta c_{TSP}(h,t)_{AD} \times u(h,t) \times a \times dh \times dt \quad (2)$$

式中, W_{TSP}、$\Delta c_{TSP}(h,t)_{AD}$ 的单位分别为 μg 和 $\mu g \cdot m^{-3}$.

如果整个监测周期 t 时段内风向都是垂直吹向AD边, 风向保持不变, 那么对微分方程式(2)做监测周期 t 和垂直扩散影响高度 h 的双重积分, 可以求出AD边上整个高度断面内通过的TSP增量, 即:

$$W_{TSP} = \iint dW_{TSP} = \iint \Delta c_{TSP}(h,t)_{AD} \times u(h,t) \times a \times dh \times dt \quad (3)$$

假设在工地边界处均匀布设了 n 个TSP监测点, 在监测周期 t 时段内风速保持不变, 工地内部扬尘均匀排放, 接下来讨论2种情况下的TSP排放量: 风向始终垂直于AD边和风向任意改变.

第1种情况: 风向始终垂直于AD边. 工地边界处4边的TSP浓度平均增量 $\Delta c_{TSP}(h,t)$ 与AD边TSP浓度平均增量的关系为:

$$\Delta c_{TSP}(h,t) = \frac{\frac{n}{4} \times \Delta c_{TSP}(h,t)_{AD}}{n} = \frac{1}{4}\Delta c_{TSP}(h,t)_{AD} \quad (4)$$

此时公式(3)中的 $\Delta c_{TSP}(h,t)_{AD} \times a$ 可以做如下变换:

$$\Delta c_{TSP}(h,t)_{AD} \times a = \Delta c_{TSP}(h,t) \times 4 \times a = \Delta c_{TSP}(h,t) \times C \quad (5)$$

式中, C 为工地周长(m).

第2种情况: 风向任意改变. 假设工地4边垂直迎风的时间都为 $t/4$(即各条边风频相等), 此时工地边界处4边的TSP浓度平均增量 $\Delta c_{TSP}(h,t)$ 与第1种情况中的 $\Delta c_{TSP}(h,t)_{AD}$ 同样符合公式(4)的关系.

因此, 以上2种情况的施工扬尘排放量相同, 将公式(5)的关系式代入公式(3)后公式(3)可以转换为:

$$W_{TSP} = \iint \Delta c_{TSP}(h,t) \times u(h,t) \times C \times dh \times dt \quad (6)$$

根据以上推论, 可以证明公式(6)同样适应于非正方形工地.

2.2.2 简易公式

可以看出, 不管是采用公式(3)还是公式(6), 通过实测数据计算施工扬尘排放量都是一件很不容易的事. 鉴于目前还未广泛实施施工扬尘在线监测, 假设在一个监测周期 t 时段内, $\Delta c_{TSP}(h,t)$ 不随时间而变化, $u(h,t)$ 不随时间和高度而变化, 以监测周期内的平均风速 u 替代 $u(h,t)$, 公式(6)可以简化为:

$$W_{TSP} = \int_0^t dt \times \int_0^\infty \Delta c_{TSP}(h) \times u \times C \times dh = t \times u \times C \times \int_0^\infty \Delta c_{TSP}(h) \times dh \quad (7)$$

式中, t 为监测周期(s); u 为监测周期 t 时段内的平均风速($m \cdot s^{-1}$).

根据实验②, 可知DF的垂直扩散公式[7]可以表达为公式(8):

$$\Delta c_{DF}(h) = \frac{M}{(h+h_0)^2} \quad (8)$$

式中, $\Delta c_{DF}(h)$ 为围挡正上方 h(m)处的平均施工降尘量[$t \cdot (km^2 \cdot 30\ d)^{-1}$]; h_0 为工地围挡高度(m), 当没有围挡时, h_0 取值2 m; h 为工地边界颗粒物监测点与围挡(2 m)上沿的垂直距离(m); M 为DF排放强度系数[$10^{-6}\ t \cdot (30\ d)^{-1}$].

根据实验③, 可知在工地附近大气环境中TSP与DF之间的关系[8]可以表达为公式(9):

$$c_{TSP} = K \times c_{DF} \quad (9)$$

式中, K 为浓度相关系数[$30\ d \cdot (10^3 \cdot km)^{-1}$]. 合并公式(8)、(9)后得到:

$$\Delta c_{TSP}(h) = \frac{M \times K}{(h+h_0)^2} = \frac{J}{(h+h_0)^2} \quad (10)$$

式中, J 为TSP排放强度系数($\mu g \cdot m^{-1}$), 在数值上等于 $M \times K$. 将公式(10)代入公式(7), 得到:

$$W_{TSP} = t \times u \times C \times \int_0^\infty \Delta c_{TSP}(h) \times dh = t \times u \times C \times \int_0^\infty \frac{J}{(h+h_0)^2} \times dh \quad (11)$$

对公式(11)进行数学推导, 得到简化后的四维通量法计算模型见公式(12):

$$W_{TSP} = \frac{t \times u \times C \times J}{h_0} \quad (12)$$

2.3 四维通量法模型应用

2.3.1 采用TSP监测数据

在工地四周边界(围挡)上方一定高度 h_1(建议为0.5~1 m)处等间隔距离(中型工地建议30~60 m)布设一定数量的TSP监测仪器. 在一定监测周期 t 时段内, 取各监测点位的平均值 $\Delta c_{TSP}(h_1)$ 并将其代入公式(10)得到:

$$J = \Delta c_{TSP}(h_1) \times (h_1 + h_0)^2 \quad (13)$$

将监测周期 t、平均风速 u、工地周长 C 和公式

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

(13) 代入公式(12), 该工地在监测周期 t 时段内排放的TSP 量为:

$$W_{TSP} = \frac{t \times u \times C \times \Delta c_{TSP}(h_1) \times (h_1 + h_0)^2}{h_0} \tag{14}$$

2.3.2 采用 DF 监测数据

在工地四周边界(围挡) 上方一定高度 h_2(以集尘缸上沿为基准, 建议为 0.5~ 1 m) 处等间隔距离(中型工地建议 30~ 60 m) 布设一定数量的集尘缸, 在具有代表性的某 DF 对照监测点位布设TSP 监测仪器. 在一定监测周期 t 时段内, 取各 DF 监测点位的平均值 $\Delta c_{DF}(h_2)$ 并将其代入公式(8) 得到:

$$M = \Delta c_{DF}(h_2) \times (h_2 + h_0)^2 \tag{15}$$

将对照点位所测得的 $c^{d}_{DF}(h_2)$ 和 $c^{d}_{TSP}(h_2)$ 代入公式(9), 得到:

$$K = \frac{c^{d}_{DF}(h_2)}{c^{d}_{TSP}(h_2)} \tag{16}$$

式中, $c^{d}_{DF}(h_2)$、$c^{d}_{TSP}(h_2)$ 分别为对照监测点位所测得的DF、TSP 浓度. 将监测周期 t、平均风速 u、工地周长 C、公式(15) 和(16) 代入公式(12), 该工地在监测周期 t 时段内排放的TSP 量为:

$$W_{TSP} = t \times u \times C \times \Delta c_{DF}(h_2) \times (h_2 + h_0)^2 \times c^{d}_{DF}(h_2)/[h_0 \times c^{d}_{TSP}(h_2)] \tag{17}$$

2.3.3 北京地区施工扬尘排放因子计算

根据实验①[6], 建设工地边界距地 3 m 高度(在围挡正上方1 m高度) 处的平均施工降尘量 Δc_{DF} = 28 t/(km^2•30 d), 将其代入公式(8) 得本地 DF 排放强度系数 M = 252[$t \cdot 10^{-6} \cdot (30\ d)^{-1}$]; 根据实验③[8], 得到本地 DF 和 TSP 浓度相关系数 K = 11.6 [$30\ d \cdot (10^3 \cdot km)^{-1}$].

按建筑面积为10 000 m^2、容积率为 2 的建筑工地为例计算施工扬尘排放量. 假设工地为正方形, 工地边长为 70.7 m, 工地边界周长 C = 282.8 m; 北京市全年平均风速取 2.3 $m \cdot s^{-1}$. 将以上参数带入公式(17) 得, 得出该工地 30 d 内 TSP 排放量 W_{TSP} = 2.46 t, 如果以建筑面积来表示排放因子, 那么施工扬尘中TSP 排放因子为 0.246 kg/(m^2•30 d), 如果以施工现场面积来表示, 则其排放因子为 0.492 kg/(m^2•30 d). 美国环保局 AP-42 文件按施工现场面积计算的排放因子为 0.269 kg/(m^2•30 d), 从数值上讲, 北京市施工扬尘排放因子是美国环保局 AP-42 文件推荐排放因子的 1.83 倍.

3 结论

(1) 本研究建立了一种量化施工扬尘颗粒物排放量的数学模型——四维通量法模型, 该模型可用 $W_{TSP} = t \times u \times C \times J \times h_0^{-1}$ 来表示.

(2) 相对暴露高度浓度剖面法, 采用四维通量法计算模型计算施工扬尘排放量更加实用和方便.

(3) 通过四维通量法计算模型所得到的北京市施工扬尘排放因子, 在数值上是美国环保局 AP-42 文件推荐排放因子的 1.83 倍.

参考文献:

[1] Muleski G E, Cowherd Jr C. Particulate emission measurements from controlled construction activities, EPA/600/R-01/031 [R]. Washington: U.S. EPA, April 2001. 12-14.

[2] Venkatram A. On estimating emissions through horizontal fluxes [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(9): 1337-1344.

[3] Tsai C J, Chang C T. An investigation of dust emissions from unpaved surfaces in Taiwan [J]. Separation and Purification Technology, 2002, **29**(2): 181-188.

[4] U.S.EPA. Chapter 13.2.3 Heavy Construction Operations. AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors[R]. Washington: U.S.EPA, 1995.

[5] 北京市环境保护局. 北京市空气质量达标战略研究[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2006.

[6] 黄玉虎, 田刚, 秦建平, 等. 不同施工阶段扬尘污染特征研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2885-2888.

[7] 田刚, 李钢, 闫宝林, 等. 施工扬尘空间扩散规律研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 259-262.

[8] 田刚, 李建民, 李钢, 等. 建筑工地大气降尘与总悬浮颗粒物相关性研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 1941-1943.

[9] Countess R. Methodology for estimating fugitive windblown and mechanically resuspended road dust emissions applicable for regional scale air quality modeling[R]. California: Countess Environmental, 2001. 19-20.

[10] HJ/T 55-2000, 大气污染物无组织排放监测技术导则[S].

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