

大气扩散模式的简要回顾

牛文胜

孙振海

(江苏省无锡市气象局, 无锡 214011) (军事医学科学院五所, 北京 100071)

摘要 对各种大气扩散模式所采用的理论和数学方法作了简要评述, 并介绍了各种模式的优缺点及应用范围。

关键词 大气扩散模式 输送理论 扩散方程

引言

大气扩散模式是一种用以处理大气污染物在大气中(主要是边界层内)输送和扩散问题的物理和数学模型。由于影响扩散过程的气象条件、地形、下垫面状况及污染本身的复杂性, 到目前为止, 基于现有的理论, 还不能找到一个适用于各种条件的大气扩散模式来描述所有这些复杂条件下的大气扩散问题。因此, 近几十年来, 气象学家们建立和发展了许多大气扩散模式, 形成了种类繁多、能够处理不同条件下大气扩散问题的大气扩散模式, 如针对特殊气象条件和地形的扩散模式: 封闭型扩散模式、熏烟型扩散模式、山区大气扩散模式和沿海大气扩散模式等。

根据这些模式处理问题所采用的理论和数学方法, 基本上可分为高斯模式及其变形模式、统计模式、大气压扩散相似模式和 K 模式。本文对这些模式所采用的理论的数学方法及各种模式的优缺点进行了简要评述。

1 高斯模式及其变形模式

根据污染和气象场的不同, 高斯扩散模式有多种形式^[1], 例如(取源点为坐标原点, x 轴与平均风向一致):

(1) 有界、高架连续点源扩散模式, 在考虑地面反射条件下, 其浓度的空间分布为:

万方数据

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (1)$$

式中 H 为有效源高, \bar{u} 为源高处的平均风速, σ_y 和 σ_z 分别是横风向和铅直向浓度分布标准差, Q 为源强(对于连续源排放, 是指单位时间的排放量)。

(2) 无界瞬时点源模式(也称烟团模式, 其中参数的含义与连续源相同), 空间点 (x, y, z) 处的浓度分布为:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (2)$$

高斯扩散模式所描述的扩散过程(实质上也包含了在实际应用中对高斯模式的一些限制)主要有: ①下垫面平坦、开阔、性质均匀, 平均流场平直、稳定, 不考虑风场的切变; ②扩散过程中, 污染物本身是被动、保守的, 即污染物和空气是无相对运动, 且扩散过程中污染物无损失、无转化。污染物在地面被反射; ③扩散在同一温度层结中发生, 平均风速大于 1.0 m/s; ④适用范围一般小于 10~20 km。

虽然高斯模式所描述的扩散过程暗示了在实际应用中对这一类模式的一些限制条件, 但是, 与其它一些类型的扩散模式相比, 这类

模式有其自身的许多优点:①高斯模式的前提假设是比较符合实际的。高斯模式的一个重要假设就是污染物的浓度分布符合正态分布模型,大量小尺度扩散试验证明,正态分布的假设至少是实际分布的一种粗略近似(尤其是对小范围扩散);②模式的物理概念反映了湍流扩散的随机性,其数学运算比较简单。从统计理论出发,在平稳、均匀湍流的假设条件下,理论上要证明污染物浓度呈正态分布,这和高斯模式的前提假设是一致的。萨顿模式和赫-帕斯奎尔模式(李宗恺等,1985)实际上可以看作是将统计理论发展为高斯模式的典型代表;③高斯类型的模式具有坚实的实验基础,扩散参数的求取均有比较可靠的经验公式或图表可供使用,在实际应用中更方便,更有实用价值;④对基本的高斯扩散模式作一些修正(如地形修正等),便可以将其用来处理一些特殊条件下的大气扩散问题;⑤由于高斯扩散模式具有解析形式,因此其数学计算简单,计算量相对较少,同时它还可以计算源和计算点之间的响应关系。

正是由于高斯模式物理概念清晰,具有很好的可植性,特别是它有很高的计算效率和空间分辨率,因而即使在现在,它仍然是最受欢迎的模式之一,同时,许多基于该模式的变形模式也应运而生,这些变形模式使得高斯模式无论从理论上,还是从实践上都有了进一步的发展。

2 统计模式

这类模式以大气扩散统计理论为基础,其中心问题是寻求扩散粒子关于时间和空间的概率分布,进一步求出扩散物质浓度的空间分布和时间变化。在均匀、平稳湍流场中,上述概率分布遵从高斯分布,可以导出高斯模式。

泰勒公式是该理论中用以求取粒子位移方差的基本公式:

$$\sigma_y^2 = 2 \overline{V'^2} \int_0^T \int_0^t R_L(\tau) d\tau dt \quad (3)$$

万方数据

$$R_L(\tau) = \frac{\overline{V'(t) \cdot V'(t + \tau)}}{\overline{V'^2(t)}} \quad (4)$$

式中 $R_L(\tau)$ 是拉格朗日自相关系数, σ_y^2 是横风向浓度分布的标准差, $V'(t)$ 是 t 时刻拉格朗日脉动速度。

泰勒公式的一个基本结论就是粒子湍流扩散的程度取决于湍流强度和脉动速度的拉格朗日相关性。湍流强度越大,则脉动速度的相关性越高,在相同时段内,粒子散布的范围越大,浓度越低。

泰勒公式要求湍流场是均匀、平稳的,但实际大气并非如此。首先,湍流脉动分量的统计平均值随取样时段的长短而变化,尤其是水平脉动分量的方差,总是随取样时段的增加而增加,因而是非平稳态的;其次,在平坦开阔地形上,水平方向流场可以认为是均匀的,但流场随高度变化很大,在近地层内,湍流铅直分量随高度的变化尤为明显,因而均匀湍流的假设也不能很好地满足。

近年来,广泛应用于物理学等领域的蒙特卡罗粒子轨迹统计方法也被引入到大气扩散问题的研究中,并有了一定的发展。这种方法对非均匀、非定常和有较强切变的复杂流场(如海陆风,山谷风等)条件下污染物扩散的计算很有效。但对于很复杂的情形,为了达到满意精度,其计算是令人吃惊的。

3 大气压扩散相似模式

这类模式的理论基础是湍流相似理论,其基本原理是拉格朗日相似性假设,即流场的拉格朗日性质取决于表征流场欧拉性质的已知参量,该理论的基本方法是量纲分析法。

在相似理论基础上, Lamb^[2] (1979) 用 Deardorff^[3] (1974) 的白天行星边界层模式求得的流场计算了在有效释放高度 $Z_r > 0.025Z_i$ (Z_i 为混合层厚度) 情况下的浓度,计算的最大浓度 $C_{\max} \propto Z_r^{-1}$, 这和高斯模式

得出的 $C_{\max} \propto Z_r^{-2}$ 有所不同。

大气扩散相似理论原则上没有更多的理论限制,但是这类模式要求表征流场欧拉性质的已知参量是完备的,这一点在实际应用中很难满足。因此这类模式目前也只是应用于小尺度铅直扩散问题和扩散层厚度限制在近地层内的大气扩散问题。

4 K 模式

K 模式是建立在大气梯度——输送理论基础上的,其中心问题是求解输送-扩散方程,即求解方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K \nabla C) \quad (5)$$

式中风场 \mathbf{V} 和浓度 C 均取平均值, K 为湍流交换系数。

上述方程只有在严格的假定条件下才能求得解析解,随着计算技术的发展,近年来数值 K 模式有了很大发展,但基本上可分为如下几类:

4.1 拉格朗日型模式

这类模式也称作轨迹模式,模式所采用的坐标固定在气流微团上随气流一起移动,因此输送-扩散方程中不再出现平流项,方程可简化为:

$$\frac{dC}{dt} = \nabla \cdot (K \nabla C) \quad (6)$$

由于方程中不出现平流项,因此这类模式中也不会出现“数值伪扩散”现象。但是,对于三维流场,由于局地风矢量的切变,会使拉格朗日坐标系发生扭曲,导致计算过程变得十分复杂。

4.2 欧拉型模式

这类模式中,坐标系固定在三维空间中,气流流经固定的坐标系,污染物浓度定义在该固定坐标系中。为了减小数值伪扩散误差,欧拉型模式有多种计算方案。

(1) 差分法 这类方法是目前使用较多的一种,其优点在于直接将输送-扩散方程离散化,然后再求解离散方程,思路简单、明了、非常直观,便于程序化计算。但是,这类方法所面临的主要问题是计算的数值稳定性和计算过程中所出现的“数值伪扩散”问题,这些问题和所选用的差分方案密切相关。目前为了满足数值方案的稳定性和减小“数值伪扩散”的影响,这类模式大多采用隐式或半隐式方案。

(2) 假谱法 这类方法的基本思路是将浓度场从物理空间变换到谱空间中,在谱空间中计算浓度的导数(即 ∇C 和 $\nabla^2 C$),然后在物理空间中计算局地乘积项和时间积分,求出浓度的空间分布和时间变化。

这类模式的数学手段主要采用快速傅利叶变换技术,可以把平流扩散方程变换为谱空间的常微分方程,其计算精度很高(因为空间导数的计算是惟一的),在很大程度上消除了“数值伪扩散”造成的误差。但这种方法所遇到的一个重大困难是边界条件的确定相当复杂。

(3) 有限元方法 这类方法的核心是将所考虑的区域分为有限数目的子区,这些子区上的值用一系列简单的离散函数来表示,如低阶多项式等;然后,在各子区上求解多元方程组,在求解过程中要保证子区边界上值的连续性。这类方法的关键在于在各个子区上寻找恰当的离散函数来表示该子区上变量的值。

有限元方法在模拟复杂地形扩散时比较方便,但其有 2 个缺陷:①子区上函数的确定有很大的主观性;②如果子区分得太多,计算量非常大,目前基于有限元方法的模式很多,但以 Galerkin 的权重剩余法应用最多。

虽然欧拉型模式在近年来有巨大发展,

但无论那种模式,都摆脱不了计算过程中差分方案的数值稳定性问题。

4.3 混合型模式

这类模式同时具有欧拉型模式和拉格朗日型模式的长处,例如粒子-网格模式(PIC模式, Lange^[4], 1978), 矩方法(Method of moments)等。

从以上的简单回顾可以看出,K模式的约束条件很少,可以广泛应用于城市、复杂地形、远距离输送等问题。但是,K模式的一个基本缺陷在于把湍流扩散比拟为分子扩散,这一基本假设缺乏严格的物理依据和可靠的实验基础,因此模式的空间分辨率较差,不适合模拟局地扩散问题。这类模式对气象场的输入要求较高,如果输入资料达不到模式要求,则模式的优越性将无法体现;此外,与其他类型的大气扩散模式相比,欧拉型模式在计算过程中,差分方案的稳定性和“数值伪扩散”误差仍然是必须考虑的问题。

5 应用中应该注意的几个问题

当前,我国很多气象业务单位已经开始进行大气污染扩散监测和空气质量预报,综合上文,我们应该看到,在实际业务中应该着重注意以下问题:

(1)扩散参 σ_y 和 σ_z 的计算目前主要有廓线法和经验公式法,但是这2种方法所得扩散参数都有一定的局限性,建议在应用时,结合对当地长期气象观测与污染物扩散监测资料的分析,给出适合于当地的扩散参数计算方法。

(2)对于区域或更大的范围,一般来说高斯模式不太适用,这时候要采用其他的扩散模式,在选择所要采用的模式时,既要考虑到

模式的优点,同时还要考虑到诸如模式对源资料的要求、模式的计算量、模式分辨率等因素,尽可能地做到优化模式,提高效率。

(3)对于局地扩散,在地形不太复杂的条件下,可以采用高斯模式,这样不但计算速度快,同时计算精度也不会受太大影响;如果地形比较复杂,可以采用地形订正和考虑风切变影响的高斯模式。

(4)在利用高斯扩散模式时,很多时候要考虑将面源简化为点源,这时候只要比较两者的计算结果(面源可以看作是点源的积分),如果差异不是很大(一般用最大浓度的相对偏差不超过某个百分数或下风向某个距离以后,相对浓度差异很小来判断),则可以将面源简化为点源。

(5)如果要获得理论上更合理的计算模式,若采用直接解扩散方程类的扩散模式,可以嵌套流场预报模式,这时候一定要注意2个模式接口程序的设计;若采用高斯模式,流场可以采用台站的风、温预报结果,计算结果是否能够令人满意,主要就看流场预报结果。

参考文献

- 1 李宗恺,潘云仙,孙润桥. 空气污染气象学原理及应用. 北京:气象出版社,1985
- 2 Lamb B K, Shair F H and Smith T B. Atmospheric dispersion and transport within coastal regions-II. Atmos. Environ. 1978,12:2101-2118
- 3 Deardroff J W. A Three dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer. Bound. Layer Meteor. ,1974, 1:81-106
- 4 Lange R. ADPIC- A three-dimensional particle-in-cell model for the dispersal of atmospheric pollutants and its comparison to regional tracer studies. J. Appl. Meteor. , 1978, 17:320-329

作者：[牛文胜](#)，[孙振海](#)
作者单位：[牛文胜](#)(江苏省无锡市气象局, 无锡, 214011)，[孙振海](#)(军事医学科学院五所, 北京, 100071)
刊名：[气象科技](#)[PKU](#)
英文刊名：[METEOROLOGICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY](#)
年，卷(期)：2000, 28(2)
被引用次数：20次

参考文献(4条)

1. [李宗恺](#); [潘云仙](#); [孙润桥](#) [空气污染气象学原理及应用](#) 1985
2. [Lamb B K](#); [Shair F H](#); [Smith T B](#) [Atmospheric dispersion and transport within coastal regions-II](#) 1978
3. [Deardroff J W A](#) [Three dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer](#) 1974
4. [Lange R](#) [ADPIC-A three-dimensional particle-in-cell model for the dispersal of atmospheric pollutants and its comparison to regional tracer studies](#) 1978

本文读者也读过(4条)

1. [马雁军](#); [胡伟](#); [杨洪斌](#) [本溪市复杂地形条件下三维多源浓度场模拟](#) [期刊论文]-[环境科学与技术](#) 2004, 27(2)
2. [郭振华](#) [对熏烟扩散模式应用的探讨](#) [期刊论文]-[环境工程](#) 2003, 21(4)
3. [马春香](#); [赵淑敏](#); [Ma Chunxiang](#); [Zhao Shumin](#) [几种大气污染扩散模式的应用比较](#) [期刊论文]-[环境科学与管理](#) 2007, 32(10)
4. [都军民](#); [李云翔](#); [Du Junmin](#); [Li Yunxiang](#) [一种正态分布结构可靠性的改进算法](#) [期刊论文]-[河南科学](#) 2009(5)

引证文献(20条)

1. [陈祖刚](#); [王玉龙](#); [李艳桦](#); [王金鑫](#) [基于ArcEngine高斯烟团气体扩散模型的模拟实现](#) [期刊论文]-[测绘信息与工程](#) 2011(2)
2. [王义祥](#); [孙振海](#); [张攀攀](#); [郭群勇](#); [王勤耕](#) [基于GIS空气质量模拟结果的表达方法研究](#) [期刊论文]-[地理与地理信息科学](#) 2011(2)
3. [胡宏](#); [徐建刚](#) [高斯模式在点源大气污染防治绿地布局的应用](#) [期刊论文]-[山东师范大学学报（自然科学版）](#) 2008(4)
4. [张梦瑶](#); [崔晋川](#) [适用于风向变化条件的毒气扩散模型研究](#) [期刊论文]-[运筹与管理](#) 2008(3)
5. [薛文博](#); [段宁](#); [柴发合](#); [张增强](#); [施建华](#); [李浩](#) [“西电东送”贵州火电项目对区域硫沉降的影响](#) [期刊论文]-[华东电力](#) 2007(7)
6. [孙明华](#); [宋振鑫](#); [吕终亮](#); [张备](#); [胡江凯](#); [周斌](#); [马占山](#) [区域大气环境应急响应数值预报系统](#) [期刊论文]-[气象科技](#) 2010(5)
7. [姚丽萍](#) [高性能计算-GIS集成的大气环境质量分析支持系统研究](#) [学位论文] 硕士 2006
8. [陈见平](#); [束炯](#); [孙娟](#) [基于ArcGIS的突发性大气污染应急预警系统——以上海市宝山区大场镇为例](#) [期刊论文]-[江苏环境科技](#) 2008(4)
9. [马雁军](#); [胡伟](#); [杨洪斌](#) [本溪市复杂地形条件下三维多源浓度场模拟](#) [期刊论文]-[环境科学与技术](#) 2004(2)
10. [南少杰](#); [梁美生](#); [段宁](#); [柴发合](#); [许亚宣](#) [山西省燃煤电厂二氧化硫减排对硫沉降的影响分析](#) [期刊论文]-[气象与环境学报](#) 2009(3)

11. [刘爱华, 蒯琳萍](#) [放射性核素大气弥散模式研究综述](#)[期刊论文]-[气象与环境学报](#) 2011(4)
12. [罗敏](#) [高速公路气体化学品运输污染事故应急救援信息系统](#)[学位论文]硕士 2005
13. [刘蕾, 彭量, 张静雯](#) [多烟团模式在环境风险评价中的应用](#)[期刊论文]-[气象科技](#) 2010(6)
14. [许亚宣, 段宁, 柴发合, 胡筱敏, 李浩, 翁君山](#) [中国硫沉降数值模拟](#)[期刊论文]-[环境科学研究](#) 2006(5)
15. [工业点源大气污染扩散空间信息系统](#)[期刊论文]-[环境污染与防治](#) 2005(7)
16. [李海燕](#) [青岛市环境空气质量改善途径研究](#)[学位论文]硕士 2006
17. [蔡乐](#) [基于GIS的液化气船泄漏事故大气扩散模拟研究](#)[学位论文]硕士 2005
18. [张军](#) [山地复杂地形的大气污染预测模型研究](#)[学位论文]硕士 2005
19. [吴丽芳](#) [北京市大气PM₁₀及SO₂环境容量与达标消减规划研究](#)[学位论文]硕士 2006
20. [许亚宣](#) [中国硫沉降数值模拟](#)[学位论文]硕士 2005

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_qxkj200002001.aspx