

贺晨昕,李星敏,董自鹏,等.气溶胶吸湿性及其对霾形成的影响研究进展[J].陕西气象,2024(3):9-16.

文章编号:1006-4354(2024)03-0009-08

气溶胶吸湿性及其对霾形成的影响研究进展

贺晨昕^{1,2},李星敏^{1,2},董自鹏^{1,2},彭艳^{1,2},宋晓雯^{1,2}

(1. 陕西省气象科学研究所,西安 710016;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016)

摘要:气溶胶吸湿性与其微物理过程和化学性质密切相关,研究气溶胶吸湿性对于揭示雾霾的形成机制,提高云凝结核(CCN)模拟精度等具有重要意义。在调研国内外相关文献的基础上,总结了大气气溶胶吸湿性测量与模拟计算方法,梳理了气溶胶吸湿性与气溶胶粒子组分、粒径谱、粒子老化过程及混合态的关系。由于排放源和环境条件的不同,不同区域气溶胶吸湿性具有不同的变化特征,气溶胶吸湿性对霾形成具有重要影响,气溶胶吸湿性引起的辐射强迫越来越得到关注。通过以上分析总结,以期为未来与气溶胶吸湿性研究的相关工作提供参考借鉴。

关键词:气溶胶;散射吸湿增长因子;粒径吸湿增长因子;气候效应

中图分类号:X513

文献标识码:A

雾霾的形成与大气相对湿度(RH,用 H_R 表示)密切相关^[1],严重的持续性雾霾往往伴随着较高的相对湿度^[2-3],因此,气溶胶吸湿性引起了许多学者的重视,并开展了相应的研究工作。

吸湿性是指气溶胶在环境相对湿度增加时的吸水能力,是与气溶胶微物理和化学性质相关的关键参数,也是气溶胶光学性质的决定性参数之一^[4]。气溶胶吸湿后会使得粒子的形状、相态和粒径谱分布发生变化,改变气溶胶的大气化学过程、老化过程,影响气溶胶在大气中的寿命,同时使其散射系数、复折射指数和单次散射反照率等光学特性发生变化,导致辐射变化和大气能见度恶化^[5];另外,气溶胶新粒子生成过程中的成核和增长也与气溶胶吸湿增长密切相关^[6],在一定过饱和度和下,部分气溶胶还能够活化成为云滴,进而使气溶胶的气候效应、辐射效应,以及云降水过程和对流层光化学特性发生变化^[7-10]。因此,研究气溶胶吸湿性对于揭示雾霾的形成机制,提高云凝

结核(CCN)数值模拟精度,准确模拟评估气溶胶辐射、气候效应具有重要意义^[11]。

1 气溶胶吸湿性测量与模拟计算

1.1 气溶胶吸湿性测量

常用的衡量大气气溶胶吸湿能力的参数主要有粒径吸湿增长因子 $g(H_R)$ 、散射吸湿增长因子 $f(H_R)$ 和吸湿性参数 κ 。目前获取粒径吸湿增长因子 $g(H_R)$ 常用的方法主要是通过串联差分电迁移率吸湿分析仪(H-TDMA)测量,或通过电力平衡法(electrodynamic balance, EDB)对单颗粒的吸湿增长特性测量。H-TDMA方法的优势在于能够获得不同模态粒子粒径增长因子的变化规律,缺点在于 H_R 难以达到90%^[12],且未考虑碰并对测量的影响^[13]。EDB方法主要用于常见化学物种的粒径增长因子的实验室测量,不太适用于环境大气中气溶胶吸湿性测量。获取气溶胶散射吸湿增长因子 $f(H_R)$ 常用的方法主要是通过串联/并联的浊度计进行测量,该方法侧重于从

收稿日期:2024-01-31

作者简介:贺晨昕(1994—),女,汉族,陕西榆林人,硕士,助理工程师,主要从事应用气象、大气环境研究。

通信作者:李星敏(1968—),女,汉族,甘肃酒泉人,博士,正研级高工,主要从事气溶胶与大气环境研究。

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2024JC-ZDXM-18)

整体角度研究气溶胶吸湿增长^[14],能够较好地反映气溶胶吸湿增长对光学特性的影响,对于研究气溶胶的气候效应和环境效应有重要意义。但H-TDMA和串联/并联浊度计这两种方法都需要对颗粒物进行干燥或加湿处理,会对被测粒子造成一定程度的干扰。近年来利用激光雷达观测研究气溶胶吸湿性得到关注,激光雷达可以在开放大气状态下获取气溶胶消光系数随环境 H_R 的变化^[15],观测得到更贴近实际大气状况的气溶胶吸湿性质。Wulfmeyer等^[16]探索了激光雷达探测气溶胶消光系数增长因子的可行性,Pahlow等^[15]利用激光雷达和浊度计研究了美国南部大平原气溶胶吸湿增长特性。Lv等^[12]和Chen等^[17]则采用激光雷达和探空协同观测资料分别探讨了忻州和邢台的气溶胶消光系数吸湿增长因子,认为激光雷达是探测气溶胶消光吸湿增长因子的有效手段。鉴于气溶胶吸湿性对其微物理和光学特性的重要影响,研究人员对吸湿性测量进行了不断探索:顾文君^[18]开发了使用蒸汽吸附分析仪测量颗粒物质量变化,测定大气颗粒物吸湿性的方法;周家成等^[19]发展了气溶胶光学及吸湿增长特性测量装置,实现了气溶胶消光、散射、吸收和单次散射反照率吸湿增长特性的同步测量。气溶胶吸湿性测量方法的不断改进,提高了吸湿性测量的准确性,对于减小受吸湿性影响的气溶胶环境效应和气候效应评估的不确定性具有重要意义。

1.2 吸湿因子的模拟计算

常用的气溶胶粒径吸湿增长因子、散射吸湿增长因子和吸湿性参数 κ 等可以通过实验测量和建立模拟模型的方法计算。其中吸湿性参数 κ 主要通过Köhler方程,结合其定义计算出来。

定义 $g(H_R)$ 为某一 H_R 下颗粒物吸湿增长后的电迁移率当量粒径与干状态气溶胶的电迁移率当量粒径之比。有许多拟合参数方程可以用来描述 $g(H_R)$,如最简单的广泛应用于H-TDMA观测数据拟合的二参数方程:

$$g(H_R) = \alpha / (100 - H_R)^\gamma \quad (1)$$

式中, $g(H_R)$ 为粒径吸湿增长因子, α 、 γ 为拟合数据后得到的经验参数。还有一些更为复杂的

模拟模型^[20],在此不再赘述。

$f(H_R)$ 定义为某一 H_R 下的气溶胶散射系数与干燥条件下气溶胶的散射系数之比。利用加湿浊度计测量不同 H_R 下的气溶胶散射系数,可计算出不同湿度下的 $f(H_R)$ 。

针对 $f(H_R)$ 的研究已建立了许多参数拟合关系,如常用的单变量的幂函数模型、二次多项式模型、幂指数函数模型等,如式

$$f(H_R) = 1 + a(H_R/100)^b \quad (2)$$

$$f(H_R) = a + b/(1 - H_R/100) + c/(1 - H_R/100)^2 \quad (3)$$

$$f(H_R) = a(1 - H_R/100)^{-bH_R/100} \quad (4)$$

式(2)~式(4), $f(H_R)$ 为散射吸湿增长因子, a 、 b 、 c 为拟合数据后得到的经验参数。还有一些更为复杂的多项式拟合等^[21],在此不再赘述。

张城语等^[22]对上述3种模型在成都的模拟研究表明, $f(H_R)$ 模拟值与实测值的决定系数 R^2 为二次多项式模型(0.697) > 幂指数函数(0.692) > 幂函数模型(0.678),在二次多项式模型的基础上,以 H_R 和黑碳质量浓度为自变量进一步构建了气溶胶散射吸湿增长因子的双变量模型(式5),提升了 $f(H_R)$ 以及气溶胶散射消光系数的模拟精度。

$$f(H_R) = (a/(1 - H_R/100) + b/(1 - H_R/100)^2 + c)d(C_{BC})^e \quad (5)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 、 e 为拟合参数, $C_{BC}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 为黑碳气溶胶质量浓度。

佟景哲等^[23]以 H_R 、 C_{BC} 、 $C_{BC}/C(\text{PM}_{2.5})$ 、 $C(\text{PM}_{1.0})/C(\text{PM}_{2.5})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})/C(\text{PM}_{10})$ (C_{BC} 、 $C(\text{PM}_{1.0})$ 、 $C(\text{PM}_{2.5})$ 、 $C(\text{PM}_{10})$ 分别为黑碳、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度)为自变量构建了多变量的广义可加模型(GAM),采用压轴回归法(RMA)对各模型评估。结果表明:多变量的GAM模型拟合效果最佳,其次为以 H_R 和黑碳质量浓度为变量的双变量模型,单变量的二次多项式模型和单变量GAM模型拟合效果差别不大;随后佟景哲等^[24]以上述因子为变量,构建了BP神经网络模型,模拟效果明显好于多变量GAM模型、双变量模型以及单变量二次多项式模型,特别是BP神经网络模型显著降低了上述

模型在高湿($H_R > 85\%$)条件下的模拟误差。

米家媛等^[25]以 H_R 、 C_{BC} 、 $C_{BC}/C(PM_{1.0})$ 、 $C(PM_{1.0})/C(PM_{2.5})$ 以及 $C(PM_{2.5})/C(PM_{10})$ 为变量集构建了 XGBoost 模型、CatBoost 模型和 LightGBM 模型等三种气溶胶粒径吸湿增长因子的机器学习模型,模拟效果均好于气溶胶粒径吸湿增长多变量 GAM 模型,其中 LightGBM 模型模拟效果最佳。

模型从单变量模型、双变量模型到多变量模型,模拟方法也从幂函数、指数函数、多项式及二次多项式到机器学习、神经网络,模拟精度在不断提高,可见气溶胶散射吸湿增长因子具有多变量影响的非线性变化特点。对吸湿增长因子认识的不断深入,模拟计算精度提高,将会进一步提高消光系数及能见度的模拟计算结果。

2 气溶胶吸湿性的影响因子

2.1 化学组分和粒径

研究表明气溶胶吸湿性与粒子组分有关,不同的气溶胶化学组成会导致不同的吸湿增长因子。Randles^[26]对混合气溶胶的研究发现,有机化合物对气溶胶散射吸湿增长有明显的抑制作用。Malm 等^[27]在 Yosemite 国家公园研究发现,有机碳与硫酸铵质量比值从 0.57 上升至 11.15,对应的 $f(85\% \sim 90\%)$ 由 2.0 降至 1.2 以下。Ye 等^[28]在冬季上海污染大气的研究中发现,含有硫酸盐的强吸湿性组分会促进硝酸盐形成,大多数积聚模态颗粒物在雾-霾条件下会潮解,进一步降低能见度。Zieger 等^[29]在德国 Melpitz 地区的观测中发现, $f(H_R)$ 与无机物的质量分数呈正相关,气溶胶吸湿性参数 κ 与气溶胶无机成分(主要是硫酸盐和硝酸盐)和氧化的有机物呈明显正相关,而与一次来源有机物呈负相关^[30]。

顾芳等^[31]研究发现气溶胶粒径分布越窄,消光系数随 H_R 增长越快。50~200 nm 粒径段气溶胶吸湿性随粒径的增大而增大。50 nm 颗粒物主要受工业、交通等一次气溶胶排放的影响,一般是近疏水性的;100~200 nm 的颗粒物以老化的二次气溶胶为主且趋近于内混,吸湿性更强^[30]。单气溶胶粒子在 H_R 为 60%~80%时,0.6~1.0 μm 的粒子散射吸湿增长缓慢; H_R 为 80%~

95%时,0.02~0.6 μm 的粒子散射吸湿呈指数增长^[32]。邱坚等^[33]在南京城区冬季气溶胶吸湿增长特性观测中发现,粒径为 80 nm 气溶胶的吸湿性高于 40 nm 气溶胶的吸湿性,且灰霾期间不同粒径段 $g(H_R)$ 都发生较明显的增长。

2.2 粒子的老化与混合态

气溶胶吸湿性差异与变化,与气溶胶排放源及老化过程密切相关。新鲜排放的矿尘、黑碳等气溶胶几乎不吸湿;实际大气中的气溶胶通常是多种组分的混合体,一次排放的气溶胶经过复杂的老化过程后,疏水性气溶胶可以转变为具有一定吸湿性的气溶胶^[20]。化学组分分析显示,有机物的厚包裹可以明显促进气溶胶吸湿增长^[19]。对于被排放到大气中的黑碳来说:一方面黑碳在老化过程中吸附了大量吸湿性物质(硫酸盐、硝酸盐和铵盐等),使其吸湿性发生改变;另一方面在气溶胶的吸附、凝结、氧化等过程中黑碳与大气中其他气溶胶形成混合物,其不同的内混或外混结构,也会使其吸湿性产生明显改变^[22]。

3 不同区域气溶胶吸湿性特征研究

由于不同背景下气溶胶粒子谱的分布、化学组分及其混合方式不同,各地的吸湿增长因子存在明显差异。尹单丹等^[21]将成都市散射吸湿增长因子与京津冀、长三角、珠三角等地进行对比发现:成都市气溶胶散射吸湿增长因子在各 H_R 条件下均低于珠三角(广州),但总体高于京津冀和长三角(临安),且随着 H_R 的增加这种差异愈加明显。在华北地区,二次气溶胶的生成机制与 H_R 密切相关,因此不同湿度条件下的二次气溶胶生成对气溶胶吸湿性和粒径谱分布有着不同影响。同为城市人为源区气溶胶,不同季节由于其化学组分的不同,吸湿性也不同。张淑佳^[34]对大气单颗粒样品研究发现:人为源区杭州和北京的冬季,其大气单颗粒在 H_R 为 50%时开始吸湿增长,当 H_R 增至 83%~84%时潮解变成液滴态;济南夏季颗粒物在低湿条件下不增长,当 H_R 升至 72%时才开始吸湿长大, H_R 提升至 85%时才完全潮解。

不同气团来源的气溶胶其吸湿性也不同。Kotchenruther^[35]发现美国大西洋海岸中部西向

气流对应的气溶胶 $f(80\%)/f(30\%)$ 为 2.30 ± 0.24 , 北向和南向气流时为 1.81 ± 0.37 , 并且, $f(H_R)$ 随着海拔高度以及碳质气溶胶与硫酸盐气溶胶的比值的升高而降低, 但随着波长的增大而增大。Kim 等^[36] 对韩国 Gosan 地区不同气团来源的气溶胶吸湿增长特性研究表明, 沙尘、污染型(中国影响)、污染型(韩国影响)和生物质燃烧型气溶胶平均的 $f(85\%)$ 分别为 2.00 ± 0.27 、 2.77 ± 0.37 、 1.91 ± 0.16 和 1.60 ± 0.20 。Liu 等^[37] 在广州的研究发现, 城市型气溶胶、混合型气溶胶和海洋型气溶胶的平均 $f(80\%)$ 亦具有明显差异。王启花等^[38] 在黄山的研究发现: 气溶胶粒子小于 $1.1 \mu\text{m}$, 当受西南气团影响时, κ 值最大, 而受东南气团影响时, κ 值最小; 在气溶胶粒径大于 $1.1 \mu\text{m}$ 时, κ 在两个气团背景下呈现与气溶胶粒径小于 $1.1 \mu\text{m}$ 时相反的特征。

由于混合层的日变化, 气溶胶吸湿性有明显的日变化, 白天吸湿性大于夜间, 白天强吸湿模态的粒子数目比例高于夜间, 夜间气溶胶粒子的外混合程度较高^[39-41]。沈子宣等^[42] 基于北京香河气溶胶化学组分观测计算的吸湿性参数 κ 呈现良好的日变化趋势: 夜间 H_R 较高, κ 值也较高, 为 0.62 左右; 白天 H_R 降低, κ 值相应下降, 处于 0.56 左右。

在秋季和冬季, 来自西北方向西伯利亚和蒙古的清洁气团占主导地位, 其中的气溶胶吸湿性较差; 然而在春季和夏季, 来自南方的污染气团中的颗粒表现出较强吸湿性^[30]。Chen 等^[43] 基于 HTDMA、ZSR (Zdanovskii - Stokes - Robinson) 方法和 E-AIM 模型发现陕西渭南夏、冬季可溶性组分 κ 变化范围为 $0.06 \sim 0.22$ 和 $0.08 \sim 0.22$, 可溶性有机组分 κ 介于 $0.02 \sim 0.36$ 和 $0.02 \sim 0.28$, 与生物质燃烧产生的碳质气溶胶相符。

4 气溶胶吸湿性对霾形成的影响

气溶胶吸湿性对光学特性的影响在于: 一方面, 气溶胶吸湿增长过程中粒径会发生变化, 直接影响气溶胶的吸收和散射横截面, H_R 较高时, 气溶胶吸湿增长因子和气溶胶消光系数将快速增加^[44], 当 H_R 从 30% 增长到 $80\% \sim 90\%$, 散射系数可以增强 $1.64 \sim 2.31$ 倍^[45]; 另一方面, 气溶胶

在吸湿增长的过程中亲水性化学组分会发生潮解或风化现象, 使气溶胶相态发生变化, 间接影响气溶胶的光学特性^[46]; 另外, 气溶胶的吸湿增长使粒径谱发生变化, 影响散射的粒子数浓度发生变化, 也会影响散射系数的变化。粒子吸湿增长引起气溶胶消光能力进一步增强, 尤其是大气中的细模态粒子会因吸湿迅速增长到对可见光散射更为有效的粒径范围, 使气溶胶散射能力大大增强^[47]。当 H_R 较大时, 气溶胶的消光系数随着 H_R 呈现直线增长趋势^[31], 加剧能见度降低, 对雾霾的持续和恶化起到重要作用。在大气重污染期间, 老化内混颗粒物在重污染过程中占主导^[48-49], 而老化内混合的气溶胶具有很强的吸湿性^[50]; 一次排放的有机气溶胶和黑碳可能被强吸湿性组分快速包裹而增强混合颗粒物的吸湿性^[51]; $f(H_R)$ 在 H_R 为 80% 以下时变化较为平缓, 在 80% 以上时则出现突发性增长^[52]。

通过对散射吸湿增长因子 $f(H_R)$ 与气溶胶特性观测研究, Chen 等^[44] 发现 $f(H_R)$ 随着 H_R 的升高迅速增大, 污染情况下 $f(H_R)$ 显著高于干净情况下; 丁净等^[53] 对天津冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布研究表明, 污染状态下积聚模态气溶胶的吸湿性较清洁天明显增强, $g(H_R)$ 可达 $1.3 \sim 1.4$, 具有强吸湿性的气溶胶粒径范围也同时扩大, 对能见度恶化有重要贡献。Yan 等^[54] 在北京城区和上甸子开展的研究表明, 在相对清洁环境下, 北京城区与上甸子 $f(H_R)$ 的差别很小, 而在污染状况下, 北京城区的 $f(H_R)$ 要大于上甸子。对于陕西关中地区, 王昱焜等^[55] 基于 ZSR 方法发现关中清洁天、污染天的 κ 均值分别为 0.311 和 0.377 。黄耀^[56] 基于 ZSR 方法及简化模型计算发现关中 κ 均值为 0.34 , 其中, 轻霾天和重霾天的 κ 均值分别为 0.26 和 0.36 , 重霾天 $\text{PM}_{2.5}$ 吸湿参数比轻霾天略高。吸湿性参数 κ 随着能见度的降低而增大^[57], 污染天的 κ 值高于清洁天^[11]。另外冷锋过境后, 随着霾的消散, 空气质量得到明显改善, 能见度增大, 气溶胶粒子的吸湿性也会明显减弱。一方面是由于冷锋过境的清除作用, 使得老化粒子的浓度减小; 另一方面冷锋过境时, 环境温度较低, 不利于粒子之间的化学反应, 从而减

少了二次气溶胶生成,使粒子的吸湿性降低^[33]。

5 气溶胶吸湿性气候效应研究

气溶胶吸湿增长在引起粒子散射/消光能力增强、能见度下降的同时,也将改变气溶胶后向散射比和单次散射反照率,进而对气溶胶辐射效应产生复杂的影响。Kotchenruther 等^[35]发现 H_R 由 30% 增加到 80% 时,气溶胶后向散射比降低了 30%~40%,辐射强迫大致增加了一倍。Fierz-Schmidhauser 等^[58]在 GAW 站点研究了海洋边界层气溶胶的吸湿特性,发现 H_R 为 85% 时后向散射比比干状态下减少了 20%,单次散射反照率增加了 1%~5%。Fierz-Schmidhauser 等^[58]在 Jungfraujoch 站对欧洲自由对流层气溶胶的吸湿特性观测研究中发现,与干状态相比, H_R 为 85% 时气溶胶散射系数增加了 123%,后向散射比减少了 30%,单次散射反照率增加了 0.05。Masoli 等^[59]在墨西哥湾研究了 H_R 对气溶胶消光系数以及单次散射反照率的影响,发现考虑气溶胶的吸湿性对于改善气溶胶辐射强迫评估至关重要。Cheng 等^[8-9]对珠江三角洲新垦的观测和模拟表明,当 H_R 从 30% 增加到 80% 和 90% 时,散射系数分别增加了 1.54 和 2.31 倍。当 H_R 由 30% 升高至 90% 时,元素碳(EC)的内混和外混的平均单次散射反照率分别从 0.77 增加到 0.88、0.91 增加到 0.97,气溶胶直接辐射强迫与 H_R 和 EC 混合状态密切相关。Zhang 等^[60]在临安的研究发现,当 $H_R=85%$ 时,气溶胶散射吸湿增长因子为 1.58 ± 0.12 , H_R 从 40% 增加到 85%,气溶胶散射系数增加了 58%。由于气溶胶吸湿性增长,临安地区本地污染气溶胶的直接辐射强迫增加了 11.8%。

Liu 等^[61]针对有机物气溶胶吸湿性对气溶胶间接强迫的研究表明,在过饱和度为 0.1% 时,一次有机气溶胶的 κ 由 0 增加到 0.1,CCN 数浓度可增加 40%~80%;而二次有机气溶胶的 κ 增加 50% (0.14 ± 0.07),CCN 数浓度变化在 40% 以内,有机物吸湿性对 CCN 和云滴数浓度有较大影响,人为气溶胶间接强迫随有机物吸湿性的增加而减小。

由于气溶胶吸湿性影响,大气相对湿度变化

引起的大气消光及 CCN 的变化,增加了评估气溶胶辐射效应和气候效应的不确定性,与国外同类工作相比,目前仍需要开展大量的研究工作。

6 总结与展望

气溶胶吸湿性是联系气溶胶微物理参数变化和改变其化学性质的重要参数,通常使用散射吸湿增长因子、粒径吸湿增长因子和吸湿性参数来描述,气溶胶吸湿增长因子可以通过实验室测量和模型模拟计算获得。气溶胶吸湿性与粒子的化学组分、粒径大小、粒子的老化及混合态有关。由于不同排放源、不同气象条件下气溶胶粒子谱的分布、化学组分及其混合方式不同,各地的吸湿增长因子存在明显差异。污染状态下气溶胶的吸湿性明显增强,由吸湿增长引起的气溶胶消光系数的变化,对能见度恶化、严重霾天气的形成具有重要作用。气溶胶吸湿增长在引起粒子散射/消光能力增强、能见度下降的同时,也改变了气溶胶的单次散射反照率等光学参数,进而对气溶胶辐射效应产生复杂的影响。大量研究对揭示气溶胶吸湿性在重污染天气的形成、气溶胶辐射效应方面做出了积极探索,但高湿气象条件下气溶胶理化过程的复杂性、吸湿因子及其辐射效应评估的不确定性仍然存在,在以下方面还需要深入研究。

(1)气溶胶吸湿性观测仪器及观测方法有待改进。目前吸湿性测量中,在干燥、加湿气溶胶粒子的过程中,水汽的影响会使粒子的物理和化学性质发生改变,研究开发对粒子影响最小的试验测量方法,仍需要做大量研究工作。随着激光雷达、微波辐射计等垂直观测的发展,研究垂直方向上气溶胶吸湿性的分布,对于深入研究霾的形成、气溶胶消光系数的变化及对辐射的影响具有重要意义。减少吸湿性因子的不确定性仍需要开发多波段、多光学参数,具有较高灵敏度和时间分辨率的吸湿性测量仪器。

(2)建立更加精确的吸湿因子的模型。随着机器学习、人工智能技术的发展,综合考虑吸湿增长因子的多因子、非线性影响,更加准确模拟气溶胶在不同相对湿度条件下的吸湿增长过程,有助于减少吸湿增长因子的不确定性,推进吸湿性参数在模型模式中的应用。

(3)吸湿性对霾影响的研究有待于进一步深入。在霾的形成与发展过程中,气溶胶吸湿性也在发生变化,研究气溶胶吸湿性变化特征,减少吸湿性污染物的排放,对于减少或减轻霾的发生发展具有重要意义。

(4)吸湿性对气溶胶气候效应的影响研究需要进一步加强。吸湿性对气溶胶气候效应的影响包含两个方面:一方面气溶胶粒子的吸湿增长对气溶胶辐射效应产生了复杂的影响;另一方面吸湿性改变了气溶胶活化特性,从而影响 CCN 的形成。目前国内这方面的研究不多,考虑气溶胶的吸湿性对于改进气溶胶辐射强迫及气候效应的评估,减少其不确定性具有重要作用。

参考文献:

- [1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.
- [2] 曹伟华,梁旭东,李青春.北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析[J].气象学报,2013,71(5):940-951.
- [3] 周述学,邓学良,王传辉,等.华东2018年冬季一次典型雾霾过程的气象成因分析[J].高原气象,2020,39(5):214-225.
- [4] GASPARINI R, LI R J, COLLINS D R. Integration of size distributions and size-resolved hygroscopicity measured during the Houston Supersite for compositional categorization of the aerosol[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(20): 3285-3303.
- [5] LIU X G, GU J W, LI Y P, et al. Increase of aerosol scattering by hygroscopic growth: observation, modeling, and implications on visibility[J]. Atmospheric Research, 2013, 132-133: 91-101.
- [6] 陈龙.液相气溶胶粒子的结构和吸湿增长的分子模拟研究[D].北京:北京化工大学,2023.
- [7] TAO J C, ZHAO C S, MA N, et al. The impact of aerosol hygroscopic growth on the single-scattering albedo and its application on the NO₂ photolysis rate coefficient[J]. Atmos Chem Phys, 2014, 14(11): 12055-12067.
- [8] CHENG Y F, WIEDENSOHLER A, EICHLER H, et al. Aerosol optical properties and related chemical apportionment at Xinken in Pearl River Delta of China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(25): 6351-6372.
- [9] CHENG Y F, WIEDENSOHLER A, EICHLER H, et al. Relative humidity dependence of aerosol optical properties and direct radiative forcing in the surface boundary layer at Xinken in Pearl River Delta of China: an observation based numerical study [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(25): 6373-6397.
- [10] 赵洁心,马嫣,郑军.南京北郊云凝结核活化特征观测及闭合研究[J].中国环境科学,2018,38(7):2415-2424.
- [11] 陆文涛,马嫣,郑军,等.不同污染条件下南京春季CCN活化特征分析[J].中国环境科学,2021,41(9):4096-4106.
- [12] LV M, LIU D, LI Z, et al. Hygroscopic growth of atmospheric aerosol particles based on lidar, radiosonde, and in situ measurements: case studies from the Xinzhou field campaign [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 188: 60-70.
- [13] 刘新罡,张远航.大气气溶胶吸湿性质国内外研究进展[J].气候与环境研究,2010,15(6):808-816.
- [14] 孙俊英,张璐,沈小静,等.大气气溶胶散射吸湿增长特性研究进展[J].气象学报,2016,74(5):672-682.
- [15] PAHLOW M, FEINGOLD G, JEFFERSON A, et al. Comparison between lidar and nephelometer measurements of aerosol hygroscopicity at the Southern Great Plains Atmospheric Radiation Measurement site [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D05S15.
- [16] WULFMAYER V, FEINGOLD G. On the relationship between relative humidity and particle backscattering coefficient in the marine boundary layer determined with differential absorption lidar [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(D4): 4729-4741.
- [17] CHEN J, LI Z Q, LV M, et al. Aerosol hygroscopic growth, contributing factors, and impact on haze events in a severely polluted region in north-

- ern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(2): 1327-1342.
- [18] 顾文君. 一种新的吸湿性测量方法:开发及应用[D]. 广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所),2022.
- [19] 周家成. 气溶胶光学及吸湿特性测量系统研制和应用研究[D]. 安徽:中国科学技术大学,2022.
- [20] 钟佳利,王炜罡,彭超,等. 大气气溶胶吸湿性及其对环境的影响[J]. *化学进展*, 2022,34(4): 801-814.
- [21] 尹单丹,倪长健,邓也,等. 成都秋冬季气溶胶散射吸湿增长模型研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(4): 542-548.
- [22] 张城语,倪长健,佟景哲,等. 成都地区气溶胶散射吸湿增长因子双变量模型[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(12): 5467-5475.
- [23] 佟景哲,倪长健,杜云松,等. 成都气溶胶散射吸湿增长因子多变量影响分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2022,38(5): 636-644.
- [24] 佟景哲,倪长健,米家媛,等. 气溶胶散射吸湿增长因子的BP神经网络模型[J]. *环境工程*, 2023, 41(7): 131-137.
- [25] 米家媛,李娜,佟景哲,等. 气溶胶粒径吸湿增长因子的机器学习模型[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(2): 638-645.
- [26] RANGLES C A. FTIR analysis of organic functional groups during ICARTT 2004 [C]// 85th AMS Annual Meeting, Seventh Conference on Atmospheric Chemistry. San Diego, California, The United States;2005.
- [27] MALM W C , DAY D E. Optical properties of aerosols at Grand Canyon National Park[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(20): 3373-3391.
- [28] YE X N, MA Z, HU D W, et al. Size-resolved hygroscopicity of submicrometer urban aerosols in Shanghai during wintertime[J]. *Atmospheric Research*, 2011, 99(2): 353-364.
- [29] ZIEGER P, FIERZ S R, POULAIN L, et al. Influence of water uptake on the aerosol particle light scattering coefficients of the Central European aerosol[J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2014, 66(1): 22716.
- [30] 张思楠. 北京大气气溶胶吸湿性及其受有机物氧化态影响的观测研究[D]. 北京:中国气象科学研究院,2022.
- [31] 顾芳,黄亚磊,崔芬萍,等. 外混合气溶胶吸湿性对其平均消光系数的影响[J]. *科学技术与工程*, 2018,18(27): 6-11.
- [32] 王莉. 不同相对湿度下大气气溶胶粒子/粒子系的辐射特性[D]. 武汉:武汉科技大学,2022.
- [33] 邱坚,田苗苗,王晨波,等. 冬季南京城区气溶胶化学组分和吸湿性观测[J]. *中国环境监测*, 2021,37(3):93-102.
- [34] 张淑佳. 单颗粒尺度下二次有机气溶胶对无机盐吸湿性的影响[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [35] KOTCHENRUTHER R A, HOBBS P V, HEGG D A. Humidification factors for atmospheric aerosols off the mid-Atlantic coast of the United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D2): 2239-2251.
- [36] KIM J, YOON S C, JEFFERSON A, et al. Aerosol hygroscopic properties during Asian dust, pollution, and biomass burning episodes at Gosan, Korea in April 2001 [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(8): 1550-1560.
- [37] LIU X, CHENG Y, ZHANG Y, et al. Influences of relative humidity and particle chemical composition on aerosol scattering properties during the 2006 PRD campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(7): 1525-1536.
- [38] 王启花,杨素英,李艳伟,等. 黄山夏季气溶胶多尺度吸湿性的参数化方案构建研究[J]. *气象学报*, 2016, 74(6): 989-1001.
- [39] MASSLING A, STOCK M, WIEDENSOHLER A. Diurnal, weekly, and seasonal variation of hygroscopic properties of sub-micrometer urban aerosol particles[J]. *Atmos Environ*, 2005, 39(21): 3911-3922.
- [40] LIU P F, ZHAO C S, GÖBEL T, et al. Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11: 3479-3494.
- [41] 徐彬,张泽锋,李艳伟,等. 南京北郊春季气溶胶吸湿性分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 1911-1918.
- [42] 沈子宣,徐敏,胡波,等. 基于化学组分参数化的

- 大气气溶胶吸湿性特征[J]. 中国环境科学, 2022,42(1):52-60.
- [43] CHEN Y K, WANG X, PENG H Y, et al. Hygroscopicity of water-soluble PM_{2.5} in rural northwest China; contrasting contributors between summer and winter[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(15):1-20.
- [44] CHEN J, ZHAO C S, MA N, et al. Aerosol hygroscopicity parameter derived from the light scattering enhancement factor measurements in the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(3): 8105-8118.
- [45] 程雅芳. 珠江三角洲新垦地区气溶胶的辐射特性:基于观测的模型研究[D]. 北京:北京大学, 2007.
- [46] SHAMJAD P M, TRIPATHI S N, AGGARWAL S G, et al. Comparison of experimental and modeled absorption enhancement by black carbon (BC) cored polydisperse aerosols under hygroscopic conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8082-8089.
- [47] ZIEGER P, FIERZ-SCHMIDHAUSER R, WEINGARTNER E, et al. Effects of relative humidity on aerosol light scattering; results from different European sites [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013 13(4): 10609-10631.
- [48] WANG Y, WU Z J, MA N, et al. Statistical analysis and parameterization of the hygroscopic growth of the sub-micrometer urban background aerosol in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 175: 184-191.
- [49] WU Z J, ZHENG J, SHANG D J, et al. Particle hygroscopicity and its link to chemical composition in the urban atmosphere of Beijing, China, during summertime [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(8): 11495-11524.
- [50] ZHANG F, WANG Y, PENG J, et al. Uncertainty in predicting CCN activity of aged and primary aerosols[J]. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2017, 122(21): 11723-11736.
- [51] ZHAO J, DU W, ZHANG Y J, et al. Insights into aerosol chemistry during the 2015 China Victory Day parade: results from simultaneous measurements at ground level and 260 m in Beijing[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(4): 3215-3232.
- [52] 刘新昱, 张远航. 基于观测的大气气溶胶散射吸湿增长因子模型研究:以 2006 CAREBeijing 加强观测为例[J]. 中国环境科学, 2009, 29(12): 1243-1248.
- [53] 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 等. 天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 576-583.
- [54] YAN P, PAN X L, TANG J, et al. Hygroscopic growth of aerosol scattering coefficient; a comparative analysis between urban and suburban sites at winter in Beijing[J]. *Particuology*, 2009, 7(1): 52-60.
- [55] 王昱焜, 张现仁, 曹达鹏. 利用 κ -Köhler 理论研究大气气溶胶的吸湿特性[J]. 化工学报, 2019, 70(7): 2691-2698.
- [56] 黄耀. 西安大气气溶胶化学组成与吸湿性能特征[D]. 北京:中国科学院研究生院(地球环境研究所), 2015.
- [57] 沈子宣, 徐敏, 胡波, 等. 基于化学组分参数化的大气气溶胶吸湿性特征[J]. 中国环境科学, 2022,42(1):52-60.
- [58] FIERZ-SCHMIDHAUSER R, ZIEGER P, GYSEL M, et al. Measured and predicted aerosol light scattering enhancement factors at the high alpine site Jungfraujoch[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(5): 2319-2333.
- [59] MASSOLI P, BATES T S, QUINN P K, et al. Aerosol optical and hygroscopic properties during TexAQS-GoMACCS 2006 and their impact on aerosol direct radiative forcing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D7): 1-17.
- [60] ZHANG L, SUN J Y, SHEN X J, et al. Observations of relative humidity effects on aerosol light scattering in the Yangtze River Delta of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(14): 2853-2904.
- [61] LIU X H, WANG J. How important is organic aerosol hygroscopicity to aerosol indirect forcing? [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(4): 44010.