

Caratterizzazione del particolato fine atmosferico: attuale situazione e prospettive

Sandro Fuzzi

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima - Consiglio Nazionale delle Ricerche

Via Gobetti 101, 40129 Bologna, s.fuzzi@isac.cnr.it

RIASSUNTO

Grande attenzione viene riservata all'effetto del particolato atmosferico sulla salute umana, date le elevate concentrazioni di particelle in aria e la molteplicità delle sorgenti inquinanti nelle aree fortemente antropizzate quali i centri urbani. Mentre i limiti di legge per quanto riguarda la concentrazione di particolato in atmosfera sono unicamente espressi in termini di concentrazione di massa, va peraltro considerato che la composizione chimica delle particelle non è certamente di minore importanza. Nonostante i notevoli avanzamenti della ricerca nell'ultimo decennio, le conoscenze sulla composizione chimica del particolato atmosferico rimangono incomplete, anche perché rispetto agli inquinanti gassosi, il particolato è molto più complesso da caratterizzare, data la composizione chimica molto variabile e per di più dipendente dalla dimensione delle particelle. Particolarmente scarse sono tuttora le conoscenze riguardo alla componente organica del particolato atmosferico. Va infine considerata l'importanza che il particolato atmosferico riveste nel determinare il clima della Terra, grazie alle sue proprietà di interagire con la radiazione solare, di favorire la formazione delle nubi e di determinare se le nubi daranno poi luogo a precipitazioni.

INTRODUZIONE

Tutta la nostra vita si svolge, fin dal primo respiro, immersi nel mezzo gassoso che è l'atmosfera. Anche senza averne la percezione però, l'aria che respiriamo e l'atmosfera che ci circonda non sono unicamente costituite da una miscela di gas, ma contengono un numero molto elevato di particelle di dimensioni variabili, che sono comunemente conosciute come particolato atmosferico o, più propriamente, *aerosol atmosferico*.

Il particolato atmosferico è caratterizzato da una distribuzione dimensionale variabile da 3 nm (nanometro = milionesimo di millimetro) a circa 30 μm (micrometro = millesimo di millimetro). Questi limiti dimensionali dipendono da fattori puramente operativi, infatti 3 nm rappresenta il limite inferiore degli strumenti di misura oggi disponibili. Per quanto riguarda il limite superiore, particelle di dimensioni maggiori di alcune decine di micrometri sono soggette alla forza gravitazionale e sono rapidamente depositate al suolo.

Questo ampio intervallo dimensionale viene convenzionalmente diviso in:

- particelle ultrafini ($d < \text{ca. } 0.05 \mu\text{m}$);
- particelle fini ($0.05 \mu\text{m} < d < 2.5 \mu\text{m}$);
- particelle grossolane ($d > 2.5 \mu\text{m}$).

Le particelle fini, a volte definite anche *intervallo di accumulazione*, persistono in atmosfera per diversi giorni e possono quindi essere trasportate a lunga distanza ed avere effetti avversi sulla salute umana e sull'ambiente anche a migliaia di chilometri di distanza dalle sorgenti.

SORGENTI DI PARTICOLATO IN ATMOSFERA

Le particelle atmosferiche sono generate dalla combinazione di processi chimici, fisici e biologici che hanno luogo alla superficie terrestre e/o nell'atmosfera stessa. Si possono distinguere alcune categorie generali di processi che danno luogo ad emissione di particolato in atmosfera:

- processi di frammentazione: riguardano la risospensione di materiale particolato ad opera del vento (suolo, particelle marine, frammenti di vegetazione, ecc.). Questi processi immettono in atmosfera principalmente particelle grossolane;
- processi di combustione: tutti i processi di combustione: industriali, veicolari, impianti di riscaldamento, incendi boschivi, ecc., emettono in atmosfera particelle in un ampio intervallo dimensionale, da alcuni centesimi di micrometro a diversi micrometri;
- processi di trasformazione: alcuni componenti atmosferici gassosi sono soggetti a reazioni chimiche in atmosfera, generalmente attivate dalla radiazione solare, che danno luogo alla formazione di nuove particelle. Questi processi producono in genere particelle ultrafini.

Le prime due categorie di processi emettono direttamente particelle in atmosfera che sono quindi dette *primarie*. La terza categoria di processi dà luogo invece alla formazione di particelle in atmosfera da precursori gassosi, che sono perciò dette *secondarie*.

A livello globale le sorgenti naturali di particolato assommano a più dell'80% del totale del particolato emesso in atmosfera, occorre però tenere conto del fatto che la produzione di particolato da sorgenti antropiche (inquinanti) è ristretta in aree geografiche proporzionalmente molto limitate del pianeta, per cui in queste zone si raggiungono spesso concentrazioni molto elevate di particelle sospese in atmosfera. Un'indicazione di ciò si può trarre dai dati riportati in tab. 1, dove sono elencati gli ordini di grandezza del numero medio di particelle e della loro massa totale in diversi ambienti ed in diverse situazioni di inquinamento.

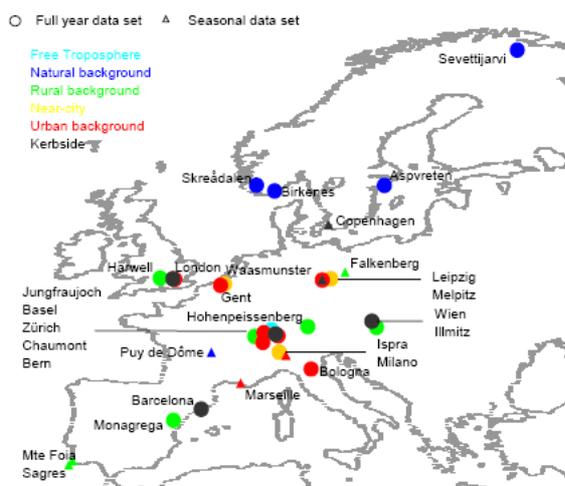
Tabella 1 - Ordini di grandezza del numero di particelle e della loro massa totale in diversi ambienti

Tipologia di ambiente	Numero di particelle (N/cm ³)	Massa totale (µg/m ³)
Emissione industriale	10 ⁷	10 ² -10 ⁵
Centro urbano	10 ⁴ -10 ⁵	50-200
Area rurale	10 ³ -10 ⁴	10-50
Area continentale remota	1000-2000	5-10
Area remota marina	100-500	1-5
Plateau antartico	10-50	< 1

LIVELLI DI CONCENTRAZIONE DI PARTICOLATO IN VARI AMBIENTI A LIVELLO EUROPEO

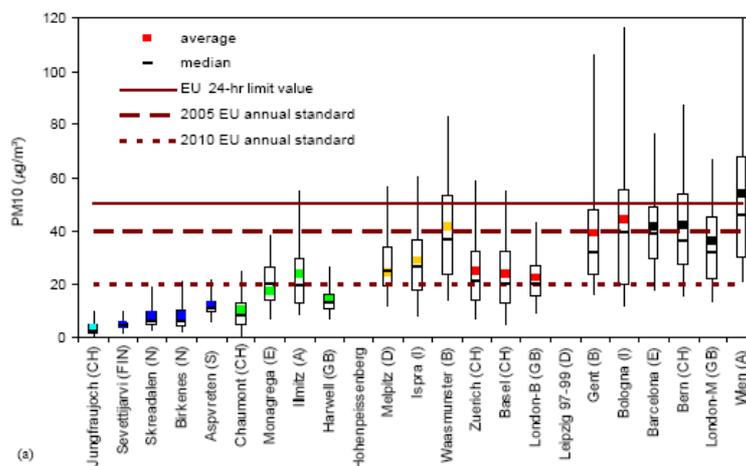
E' stato recentemente pubblicato uno studio che raggruppa i dati di concentrazione di particolato in diversi ambienti europei che vanno dalle aree remote (come il caso dell'osservatorio svizzero di Jungfrauoch posto a 3580 m di altezza) alle aree rurali, extraurbane, urbane, fino ai punti di osservazione su strade di intenso traffico (Putaud et al., 2004). La fig. 1 mostra la locazione delle stazioni di misura che hanno fornito dati per questo studio.

Figura 1 – Siti di campionamento dello studio di Putaud et al. (2004). Il diverso colore dei simboli si riferisce alla diversa tipologia di stazione, come da legenda.



In fig. 2 sono invece riportati i valori mediani ed il 5°, 25°, 75° e 95° percentile dei valori giornalieri di PM₁₀ nei diversi punti di misura. Come si vede, la maggior parte delle stazioni urbane eccede chiaramente i limiti imposti dalla legislazione europea corrente, per non parlare di quelli che saranno i limiti futuri.

Figura 2 – Media annuale della concentrazione giornaliera di PM₁₀ nelle varie stazioni oggetto di studio.



COMPOSIZIONE CHIMICA DEL PARTICOLATO ATMOSFERICO

I limiti di legge per quanto riguarda la concentrazione di particolato in atmosfera sono unicamente espressi in termini di concentrazione di massa (PM₁₀ o PM_{2.5}), essenzialmente perché questo è l'unico tipo di misura che è possibile effettuare in automatico ed usando strumentazione da campagna. Va peraltro considerato che, dato che questi limiti sono principalmente posti a tutela della salute umana, la composizione chimica delle particelle non è certamente di minore importanza.

Rispetto agli inquinanti gassosi, il particolato atmosferico è molto più complesso da caratterizzare, data la composizione chimica molto variabile e che è per di più dipendente dalla dimensione delle particelle. In generale si può comunque affermare che la composizione chimica del particolato atmosferico è materia complessa e non ancora sufficientemente esplorata.

La frazione dimensionale del particolato più importante dal punto di vista degli effetti ambientali è la cosiddetta frazione fine, la cui definizione non è univoca, dato che alcuni utilizzano questo termine per identificare il PM_{2.5}, mentre altri identificano questa frazione con il particolato sub-micronico (PM₁). In questo contesto ci si atterrà alla seconda definizione che ha il vantaggio di escludere quasi totalmente il contributo del particolato naturale (ad esempio la risospensione di particelle dal suolo).

I composti principali contenuti nella frazione fine del particolato sono in linea di massima gli ioni inorganici solfato (SO₄²⁻), nitrato (NO₃⁻) ed ammonio (NH₄⁺), i composti organici ed il cosiddetto *black carbon* (BC).

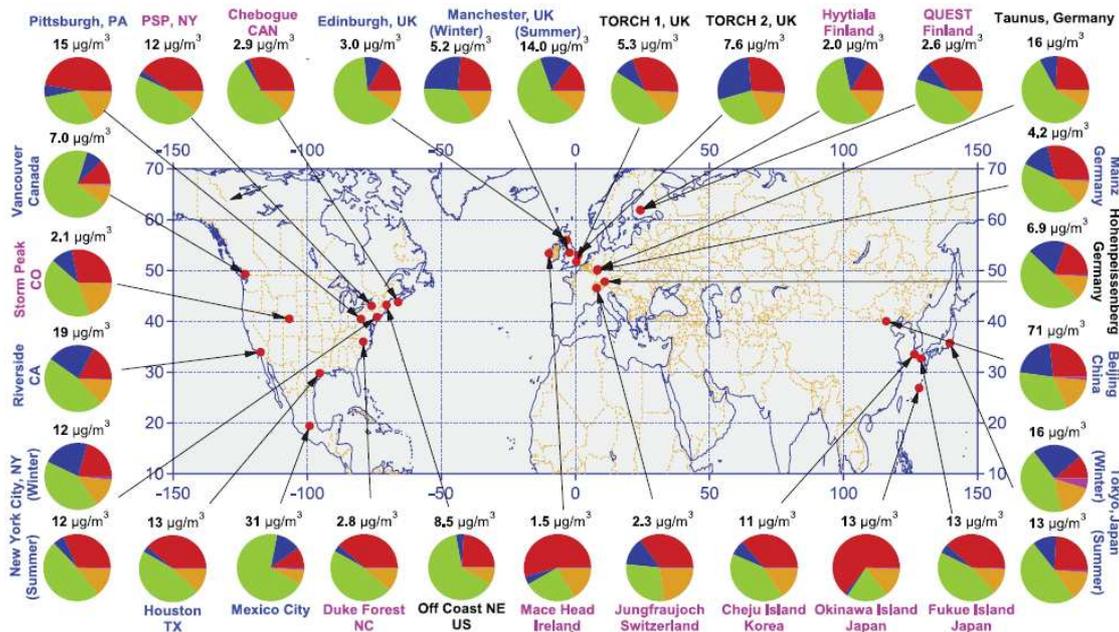
Varie sono le tecniche di misura della composizione chimica del particolato atmosferico e sarebbe oltremodo difficile descriverle compiutamente in questa sede. Recentemente però, è stato sviluppato uno strumento che fornisce in tempo reale la composizione chimica del particolato atmosferico e la sua distribuzione dimensionale nell'intervallo 50-600 nm. Si tratta dell'*Aerosol Mass Spectrometer* (AMS) prodotto dall'americana *Aerodyne* e del quale esistono oggi meno di 50 esemplari in tutto il mondo, principalmente utilizzati per scopi di ricerca.

Negli ultimi 5-6 anni questo strumento ha permesso una classificazione a livello globale, anche se certamente non esauriente, della composizione chimica del particolato fine in diversi paesi e diverse condizioni di inquinamento (Zhang et al., 2007).

Come si vede dalla fig. 3, il particolato nei diversi siti è composto di solfato e nitrato d'ammonio e da composti organici, in proporzioni diverse a seconda della localizzazione del sito e del livello di inquinamento. L'AMS non è ancora in grado di misurare il BC, anche se è già stato sviluppato un primo prototipo a questo fine.

A proposito dei composti organici presenti nel particolato atmosferico, vi è da dire che si tratta di decine di migliaia di specie, molte delle quali mai rilevate e solo ipotizzate da simulazioni modellistiche (Goldstein and Galbally, 2007). La conoscenza in questo settore è tuttora molto scarsa, anche se la ricerca in questo campo sta compiendo negli ultimi anni notevoli progressi (Fuzzi et al., 2006).

Figura 3 – Panoramica della concentrazione di massa e della composizione chimica del particolato fine atmosferico in diverse aree della terra, divisa fra: composti organici (verde), solfato (rosso), nitrato (blu), ammonio (arancio). I nomi delle località indicati in blu si riferiscono ad aree urbane, mentre quelli indicati in viola si riferiscono a località remote non inquinate (Zhang et al., 2007).

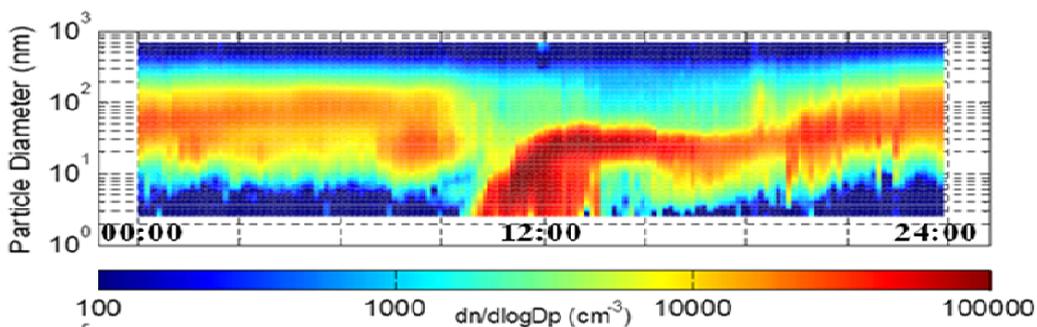


PARTICELLE SECONDARIE

La composizione chimica del particolato atmosferico in una determinata area geografica dipende dalle sorgenti, dai processi fisici e chimici di trasformazione del particolato stesso, e dai processi di trasporto e rimescolamento causati dai moti atmosferici. Il particolato atmosferico, come detto in precedenza, comprende anche una frazione non emessa come tale, ma dovuta ai processi che trasformano precursori gassosi in materiale particolato, processi mediati dalla radiazione solare (reazioni fotochimiche).

I processi di trasformazione chimica in atmosfera che generano particolato a partire da componenti gassosi pongono un ulteriore problema, dato che usualmente le problematiche della qualità dell'aria connesse agli inquinanti gassosi ed al particolato sono trattate separatamente. In effetti, la chimica dell'atmosfera, nelle aree urbane in particolare, è molto complessa e fortemente non lineare. Simulazioni modellistiche hanno infatti evidenziato come riduzioni della concentrazione di inquinanti gassosi possano in alcuni casi produrre un aumento della concentrazione di particolato fine. Ne deriva che ogni azione di miglioramento della qualità dell'aria dovrà in futuro prevedere un approccio integrato che tenga conto degli inquinanti nel loro complesso: gassosi e particolati.

Figura 4 – Evoluzione temporale dei fenomeni di formazione di nuove particelle a partire da precursori gassosi nella Pianura Padana (Hamed et al., 2007).



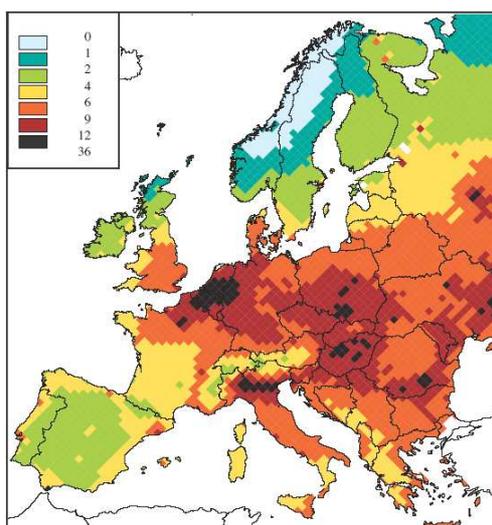
Nella Pianura Padana, una delle aree notoriamente più inquinate d'Europa, la frequenza di formazione di nuove particelle a partire da precursori gassosi ha luogo in media il 36% dei giorni, su un arco temporale di tre anni (Hamed et al., 2007). Il grafico in fig. 4 illustra questo processo.

Attorno a metà giornata, quando la radiazione solare è più intensa, ha luogo il processo di nucleazione che in alcuni minuti crea diverse decine di migliaia di nuove particelle ultrafini (2-3 nm di diametro) per cm³; nell'arco della giornata poi, queste particelle ultrafini coagulano fra loro producendo particelle di dimensioni attorno a 100-200 nm.

PARTICOLATO ATMOSFERICO E CLIMA

Grande attenzione viene riservata all'effetto del particolato atmosferico sulla salute umana, date le elevate concentrazioni di particelle in aria e la molteplicità delle sorgenti inquinanti nelle aree fortemente antropizzate quali i centri urbani. Diversi studi epidemiologici hanno infatti dimostrato che l'esposizione a lungo termine ad alte concentrazioni di particolato atmosferico aumentano il rischio di malattie cardiovascolari, di affezioni respiratorie ed anche l'insorgenza di tumori. Un recente studio dell'Agenzia Europea per l'Ambiente (fig. 5) ha stimato che l'esposizione ad elevate concentrazioni di particolato riduce l'aspettativa di vita di 8 mesi in media nei 25 paesi dell'Unione Europea, con punte fino a 18 mesi in regioni particolarmente inquinate come la Pianura Padana (European Environmental Agency, 2007).

Figura 5 – Diminuzione dell'aspettativa di vita (in mesi) in diverse aree d'Europa, dovuta ad esposizione ad elevate concentrazioni di particolato fine (European Environmental Agency, 2007).



Ciò che invece è ancora poco conosciuto ai più è l'importanza che il particolato atmosferico riveste nel determinare il clima della Terra, grazie alle sue proprietà di interagire con la radiazione solare, di favorire la formazione delle nubi e di determinare se le nubi daranno poi luogo a precipitazioni.

Gli effetti del particolato atmosferico sul clima possono essere in estrema sintesi classificati come *effetti diretti* (interazione con la radiazione solare) ed *effetti indiretti* (modificazione della struttura delle nubi). Le particelle presenti in atmosfera riflettono la radiazione solare incidente riducendo la quantità di energia che raggiunge la superficie del pianeta e riducendo quindi la temperatura della Terra. Gli effetti indiretti del particolato atmosferico sul clima derivano dalla proprietà delle particelle di agire come nuclei di condensazione sui quali si aggregano le molecole di vapore acqueo a formare le goccioline di nube. Le particelle atmosferiche sono infatti indispensabili alla formazione delle nubi. Più particelle sono presenti, più goccioline si formano. Dato che in una nube il contenuto di acqua è determinato, un aumento del numero delle goccioline farà sì che queste siano mediamente più piccole. Nubi formate da goccioline più piccole riflettono più efficacemente la radiazione solare diminuendo la quantità di radiazione che raggiunge la superficie ed esercitando quindi anch'esse un effetto di raffreddamento. Inoltre, più piccole sono le goccioline in una nube, più difficilmente la nube stessa darà luogo a precipitazione, aumentando quindi la sua persistenza in atmosfera con ulteriore effetto di raffreddamento della superficie (Rosenfeld et al., 2008).

Da ultimo occorre segnalare un ambito, al quale viene riservata una crescente attenzione, che riguarda la relazione fra inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici. Occorre considerare infatti che le sorgenti di emissione di inquinanti che influenzano il clima, il particolato atmosferico in primo luogo, sono le stesse che influenzano la qualità dell'aria. Per contro, le normative per la qualità dell'aria e quelle per la protezione del clima sono completamente scollegate, sia a livello di intervento che, spesso, a livello delle autorità preposte al loro controllo. E' acquisizione recente a livello scientifico il fatto che le due problematiche sono strettamente correlate ed è stato valutato come politiche specifiche volte al contrasto di uno dei due fenomeni possano comportare effetti negativi per l'altro. Diversi studi a livello internazionale hanno dimostrato l'evidenza di notevoli benefici in termini di riduzione dei costi ottenibili combinando le politiche di controllo dell'inquinamento atmosferico e quelle di mitigazione dei cambiamenti climatici (European Environmental Agency, 2006).

Bibliografia

- European Environmental Agency *Air Quality and Ancillary Benefits of Climate Change Policies*. (2006) EEA Report No 4/2006, Copenhagen.
- European Environmental Agency *Air Pollution in Europe 1990-2004*. (2007) EEA Report No 2/2007, Copenhagen.
- Fuzzi, S., M.O. Andreae, B.J. Huebert, M. Kulmala, T.C. Bond, M. Boy, S.J. Doherty, A. Guenther, M. Kanakidou, K. Kawamura, V.-M. Kerminen, U. Lohmann, L.M. Russell and U. Pöschl *Critical assessment of the current state of scientific knowledge, terminology, and research needs concerning the role of organic aerosols in the atmosphere, climate, and global change*. (2006) *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2017-2038.
- Goldstein A.H. and I.E. Galbally *Known and unexplored organic constituents in the earth's atmosphere*. (2007) *Environ. Sci. Technol.*, 41, 1514-1521.
- Hamed, A, J. Joutsensaari, S. Mikkonen, L. Sogacheva, M. Dal Maso, M. Kulmala, F. Cavalli, S. Fuzzi, M.C. Facchini, S. Decesari, M. Mircea, K.E.J. Lehtinen and A. Laaksonen *Nucleation and growth of new particles in Po Valley, Italy*. (2006) *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 355-376.
- Putaud, J.-P., F. Raes, R. Van Dingenen, U. Baltensperger, E. Brüggemann, M.C. Facchini, S. Decesari, S. Fuzzi, R. Gehrig, H.C. Hansson, C. Hüglin, P. Laj, G. Lorbeer, W. Maenhaut, N. Mihalopoulos, K. Müller, X. Querol, S. Rodriguez, J. Schneider, G. Spindler, H. ten Brink, K. Tørseth, B. Wehner and A. Wiedensohler *A European Aerosol Phenomenology. 2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe*. (2004) *Atmos. Environ.*, 38, 2579-2595.
- Rosenfeld, D., U. Lohmann, G.B. Raga, C.D. O'Dowd, M. Kulmala, S. Fuzzi, A. Reissell and M.O. Andreae *Flood or drought: how do aerosol affect precipitation?* (2008) *Science*, 321, 1309-1313.
- Zhang, Q.; Jimenez, J.L.; Canagaratna, M.R.; Allan, J.D.; Coe, H.; Ulbrich, I.; Alfarra, M.R.; Takami, A.; Middlebrook, A.M.; Sun, Y.L.; Dzepina, K.; Dunlea, E.; Docherty, K.; DeCarlo, P.F.; Salcedo, D.; Onasch, T.; Jayne, J.T.; Miyoshi, T.; Shimojo, A.; Hatakeyama, S.; Takegawa, N.; Kondo, Y.; Schneider, J.; Drewnick, F.; Borrmann, S.; Weimer, S.; Demerjian, K.; Williams, P.; Bower, K.; Bahreini, R.; Cottrell, L.; Griffin, R.J.; Rautiainen, J.; Sun, J.Y.; Zhang, Y.M.; Worsnop, D.R. *Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes*. (2007) *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13801, doi:10.1029/2007GL029979.