



上海市霾与非霾期间颗粒态汞 的污染特征

School of Environmental Science and Engineering
Shanghai Jiao Tong University
上海交通大学环境科学与工程学院

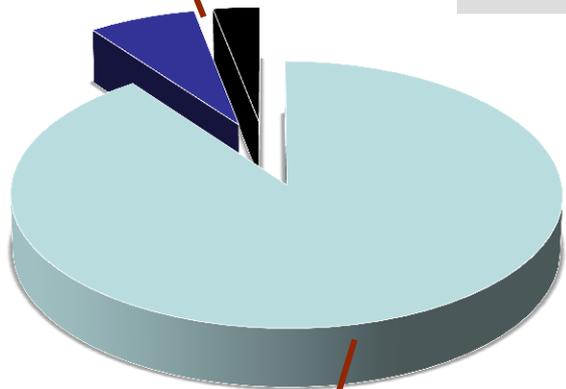
程金平 陈筱佳 Rajasekhar Bala 王文华

December, 2015



包括 HgCl_2 、 $\text{Hg}(\text{OH})_2$ 、 HgBr_2 等
易吸附在颗粒物表面和溶解于水中
停留时间短，容易沉降

吸附于大气颗粒物的汞
停留时间短，容易沉降



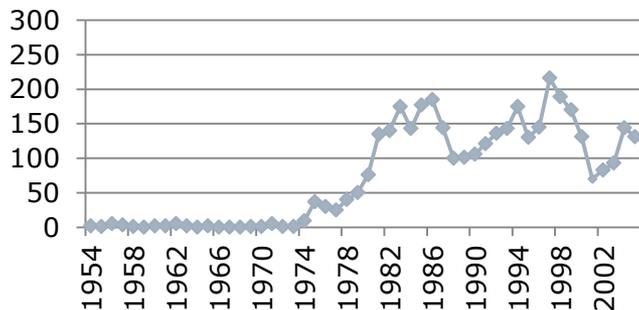
- GEM, 气态单质汞
- RGM, 活性气态汞
- PHg, 颗粒态汞

可以在大气中停留0.5到1年，难以通过干湿沉降去除
可以远距离传输参与全球汞的循环，成为全球性污染物

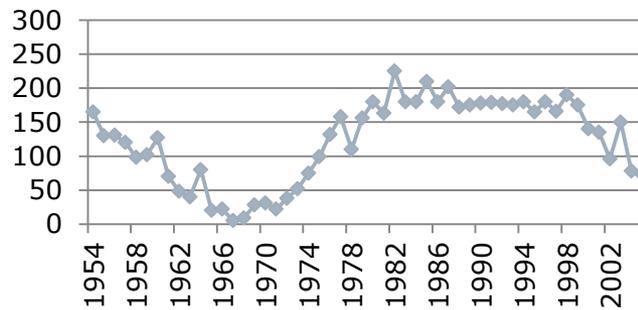
中国是燃煤大国，是被认为是人为汞排放量最大的国家之一，占到了全球人为排放汞量的三分之一。因此一直以来中国都备受国际舆论的谴责。

造成大气汞成为全球性污染物的是主要是气态单质汞

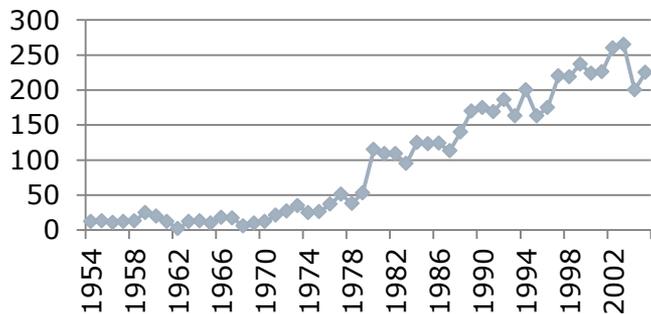
广州



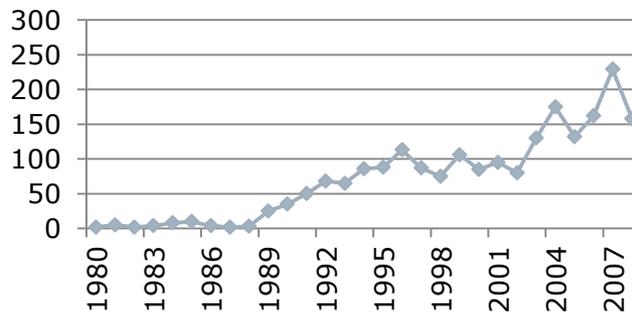
北京



南京



深圳



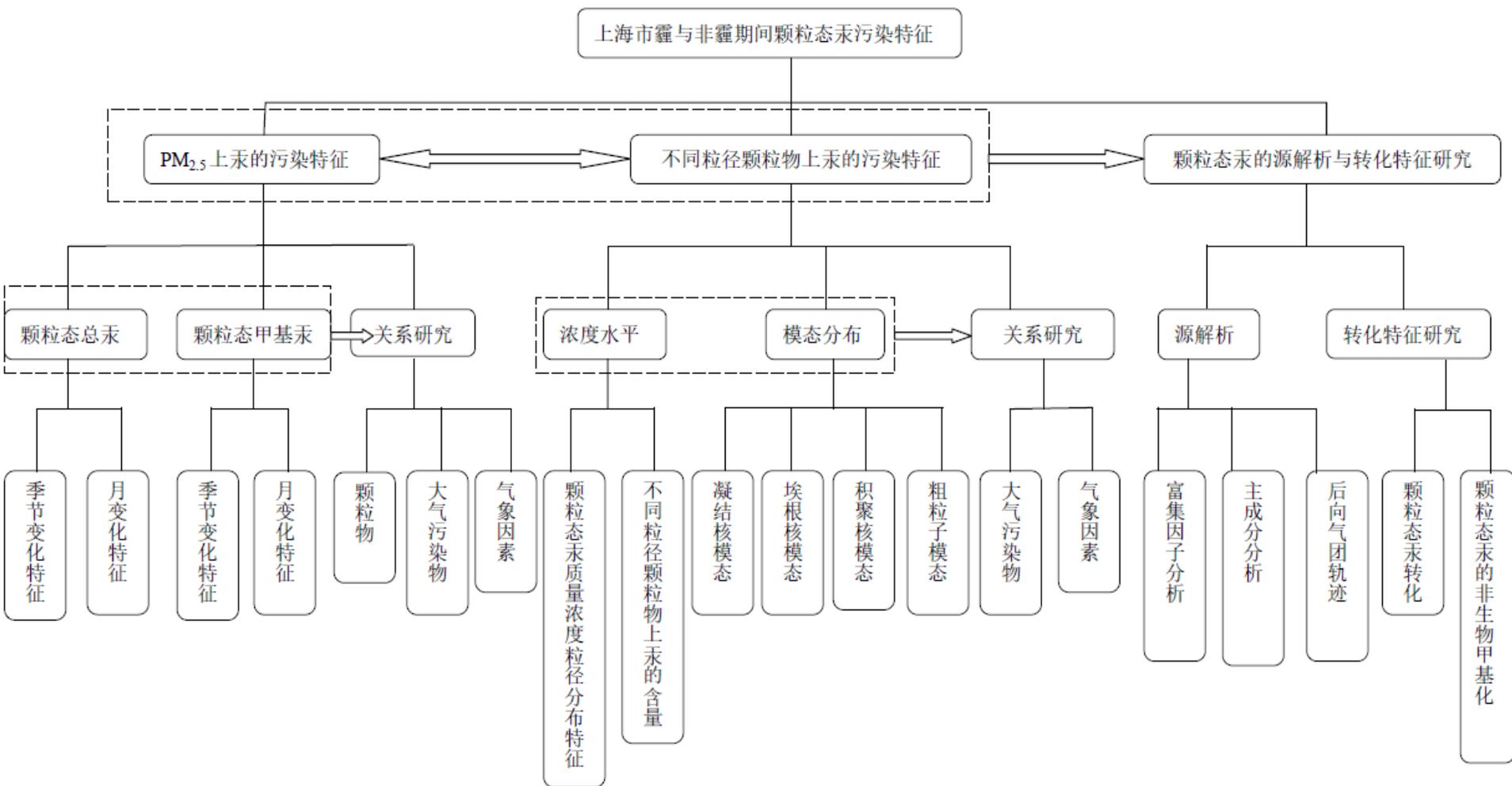
霾的天数 源自吴兑

我国霾污染频发，平均每不到**3**天就有一次霾污染。

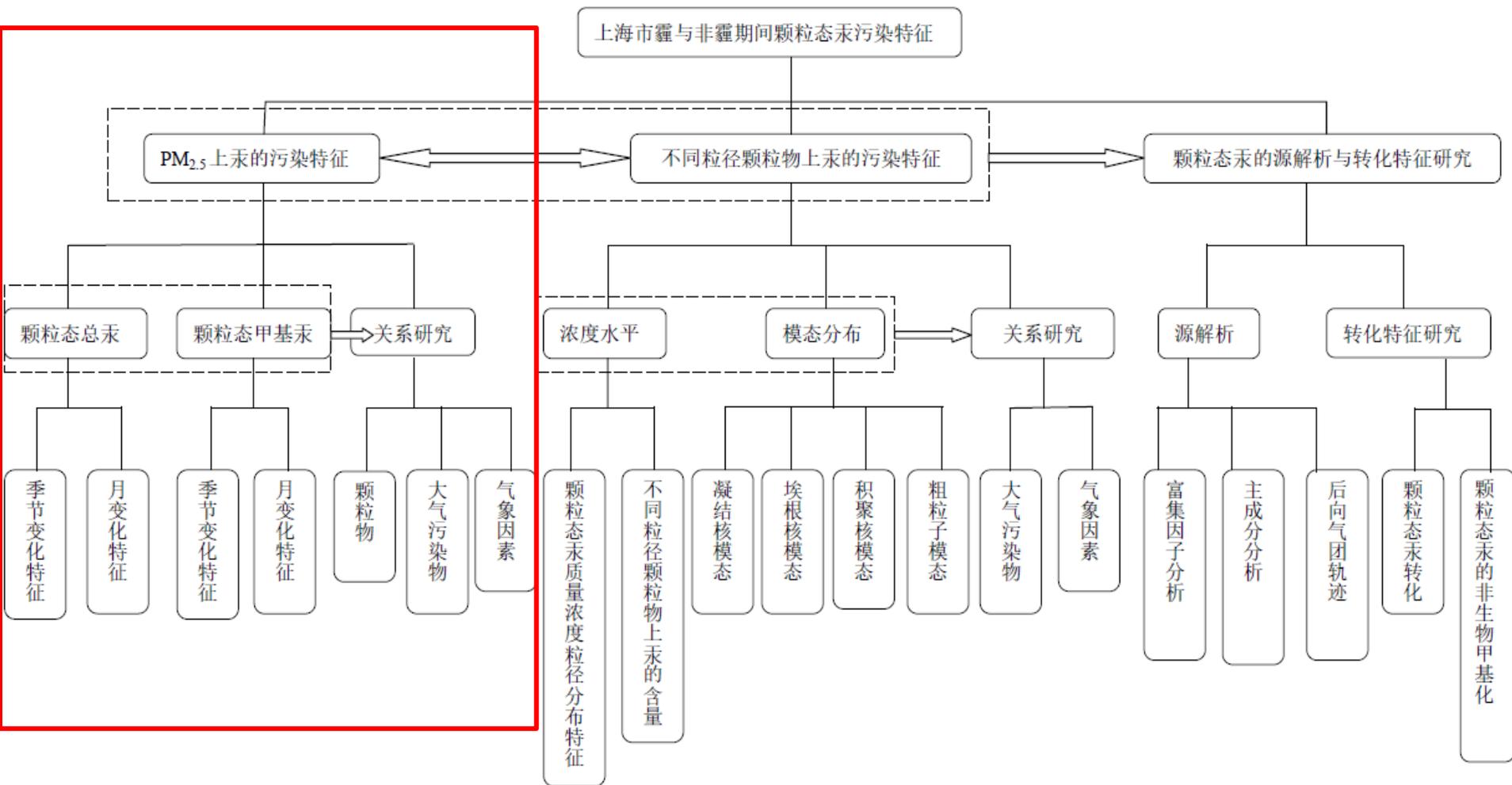
霾污染是一种非常复杂的复合污染，对气态汞和颗粒态汞间的循环转化可能存在一定的影响。

- 研究霾与非霾期间颗粒态汞的污染特征，并进行源解析和转化特征的初步研究，为霾污染情况下汞的循环特征研究提供基础数据，并为霾污染条件下中国对全球大气汞的贡献变化研究提供线索

技术路线图



技术路线图



④ 细颗粒物采集

采样仪器：中流量PM_{2.5}大气颗粒物采样器，平均流量为100L/min。

采样时间：2013年1月1日至2013年12月31日，每天连续采集24h。

④ 样品分析

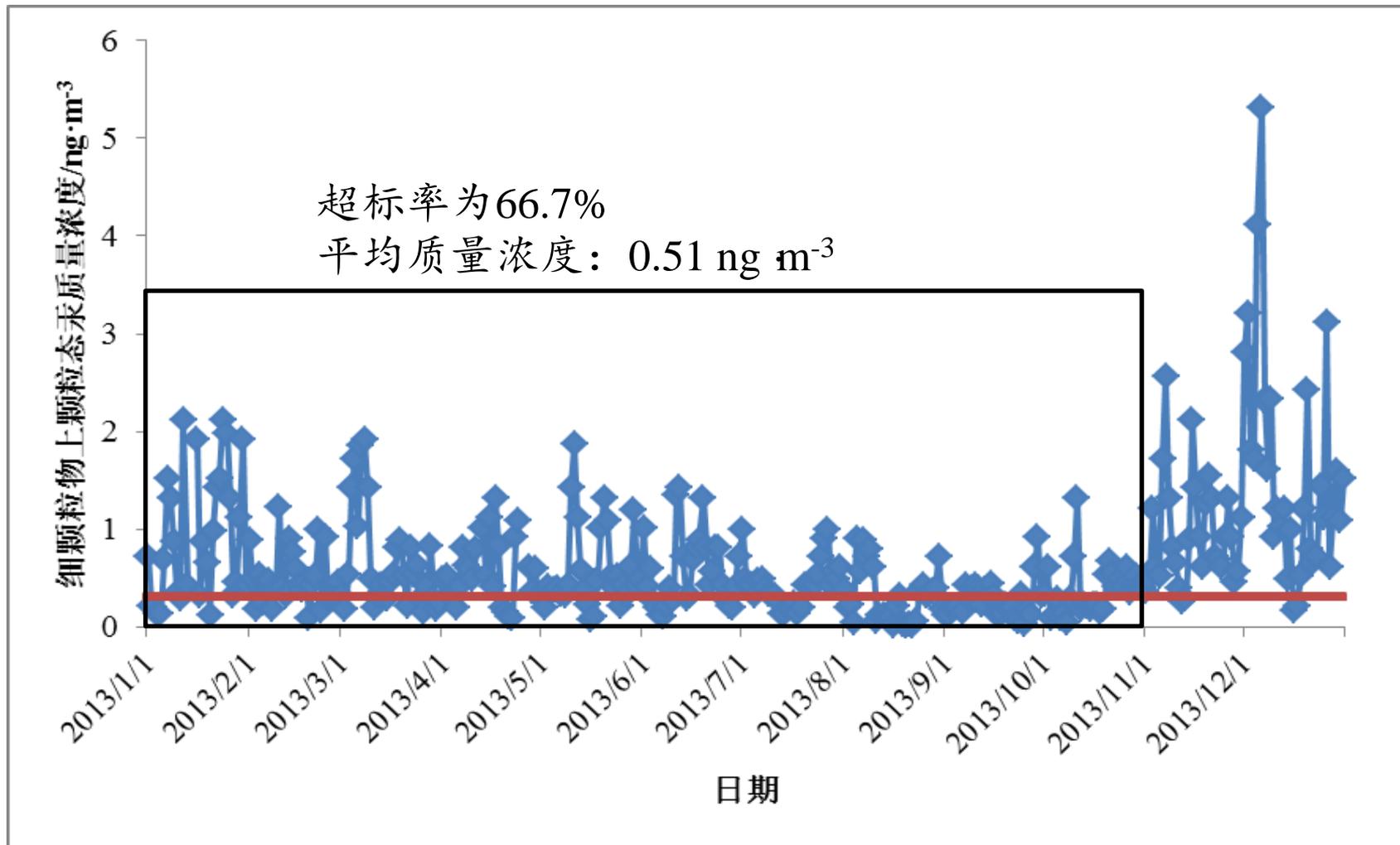
总汞测定：微波消解-电感耦合等离子质谱（ICP-MS）法

甲基汞测定：配有电子捕获检测器的气相色谱法



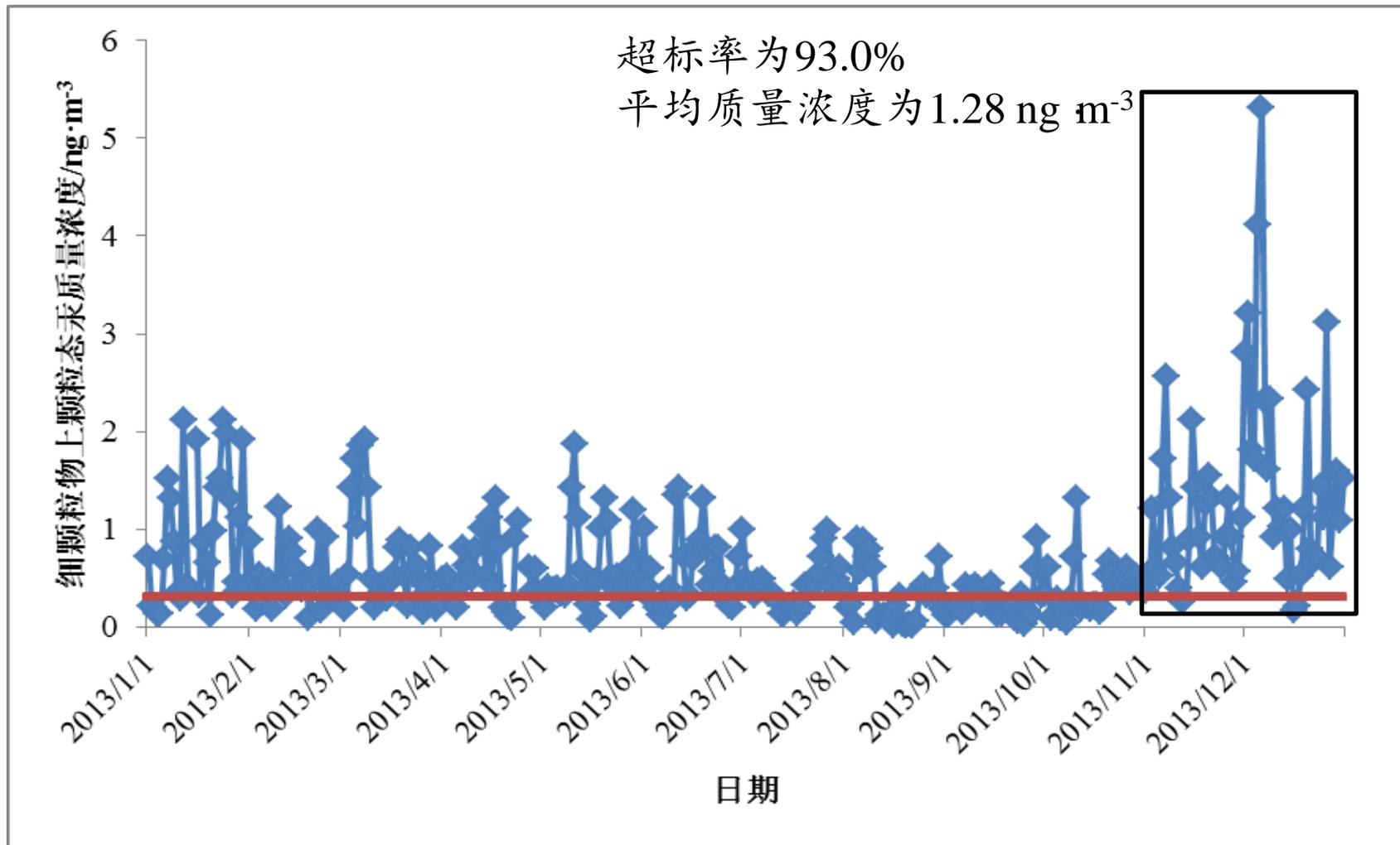


月份变化特征





月份变化特征





月份变化特征

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PM _{2.5} 上汞含量 (pg·μg ⁻¹)	7.89	8.46	10.49	9.55	9.99	9.11	8.38	7.74	8.54	9.21	11.12	11.28

$$K_p = \frac{P_{Hg}/PM}{Hg_{PM_{2.5}}} \quad \text{与温度负相关}$$

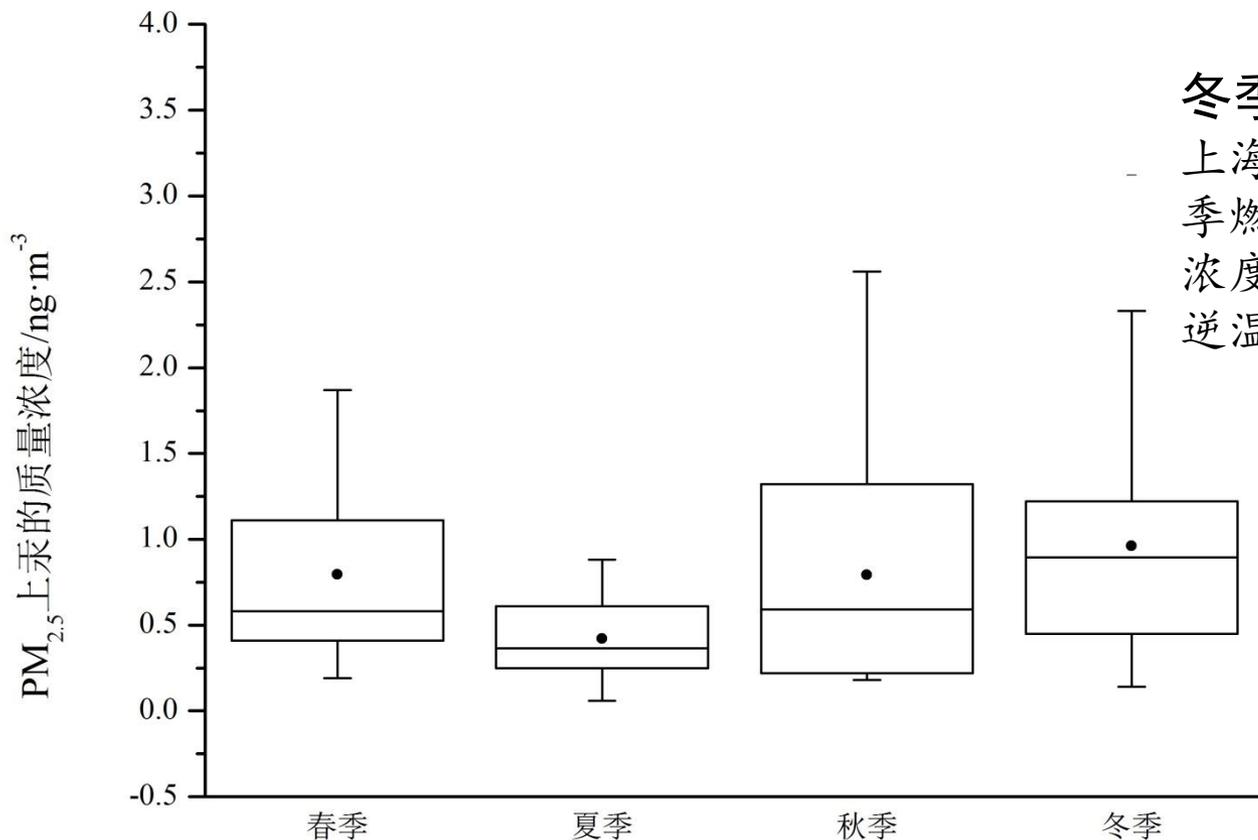
温度降低，颗粒物上汞的吸附量也会增加

细颗粒物上汞的质量浓度随温度的变化高于细颗粒物



季节变化特征

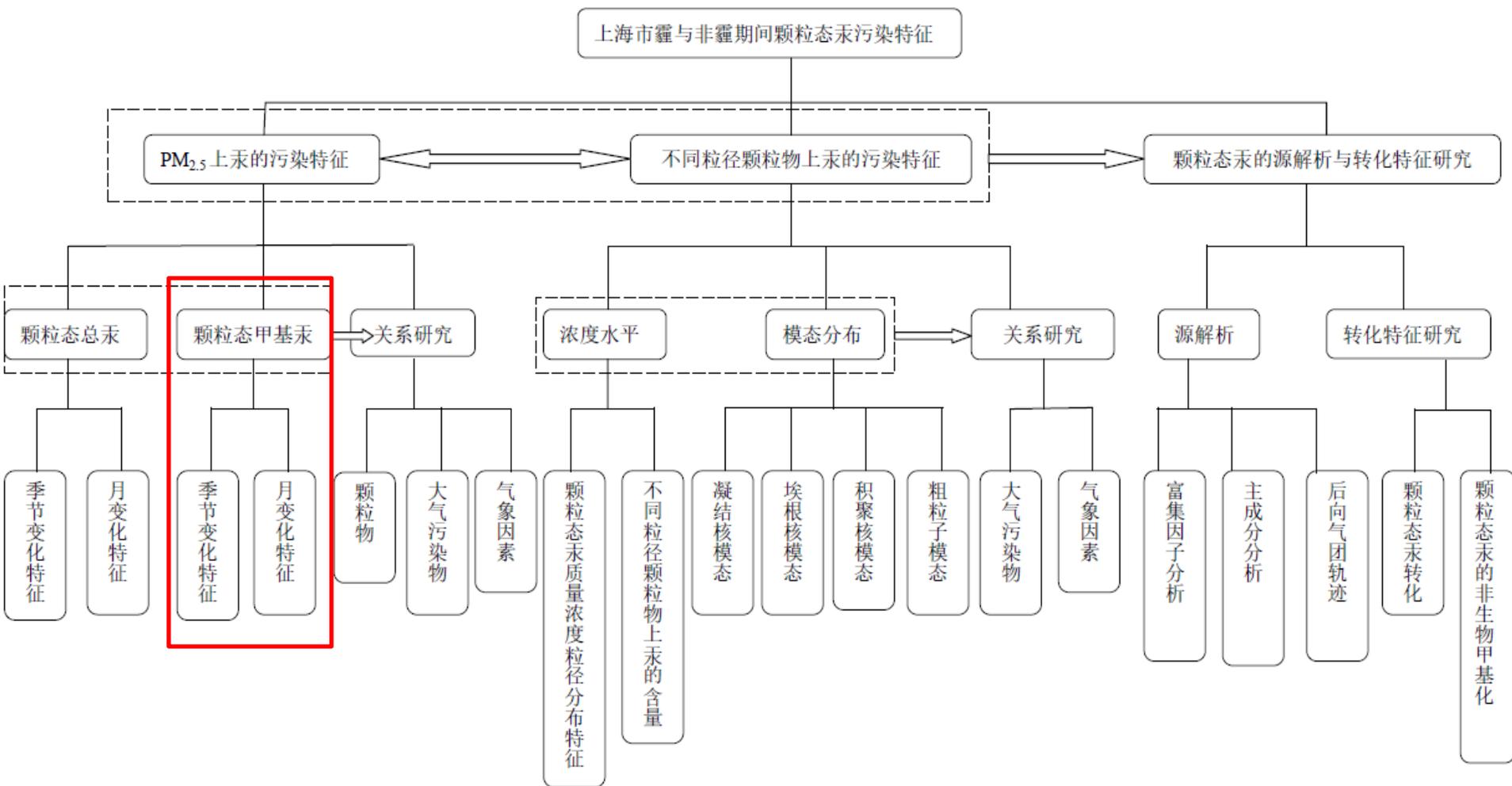
冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季



冬季

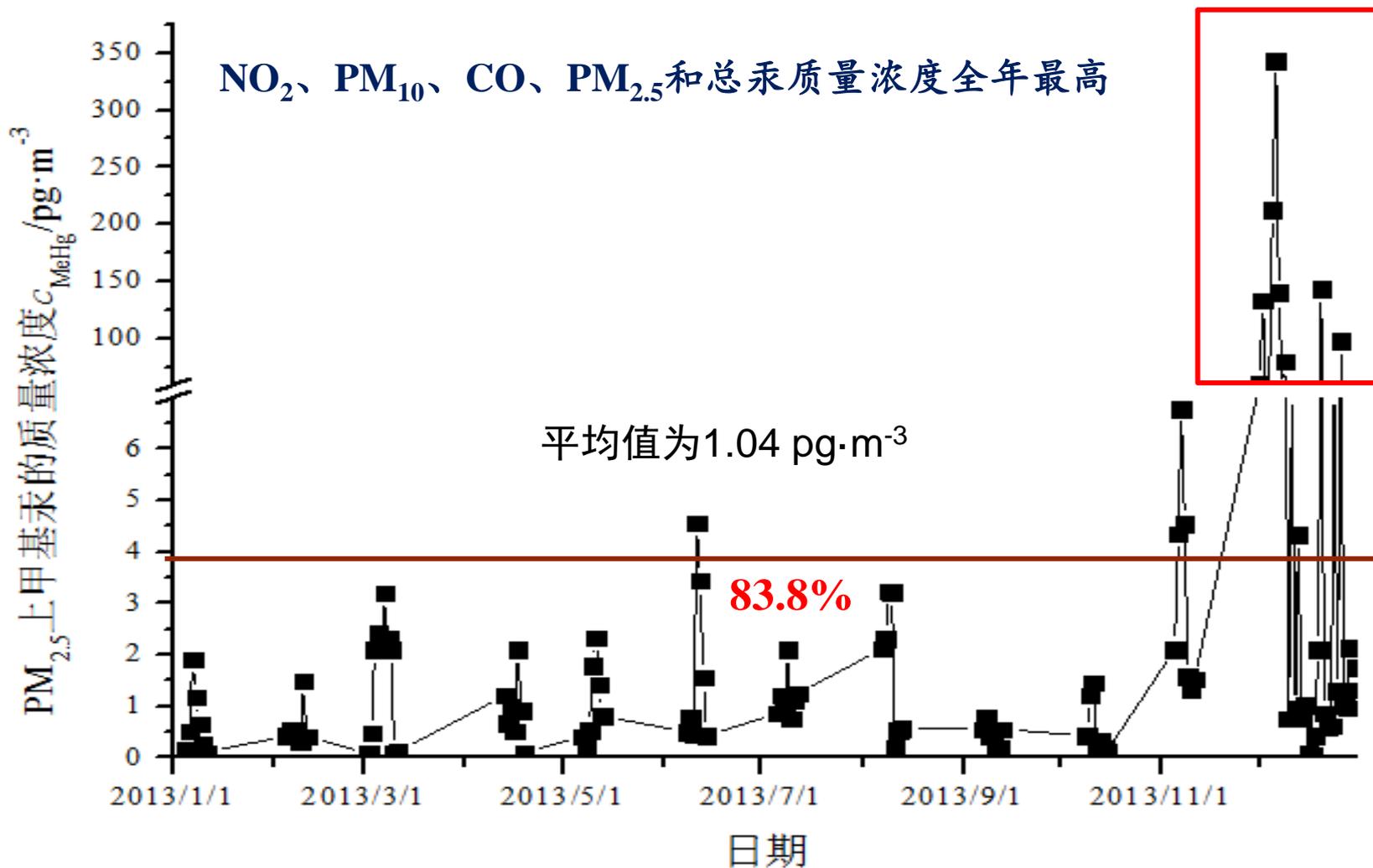
上海的能源结构以煤炭为主，冬季燃煤量的增加会导致颗粒态汞浓度的增加
逆温层，污染物不易扩散

技术路线图



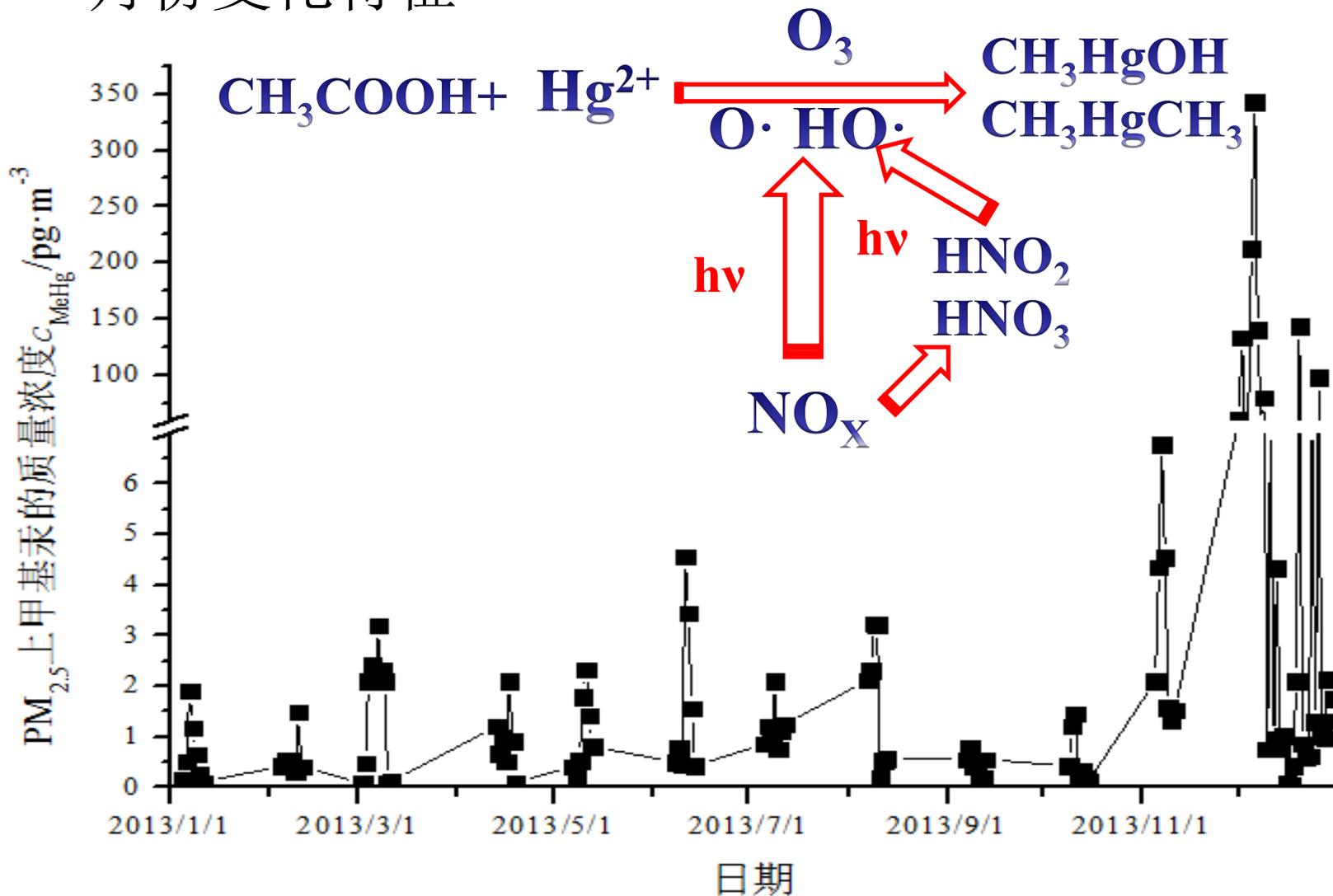


月份变化特征





月份变化特征





季节变化特征

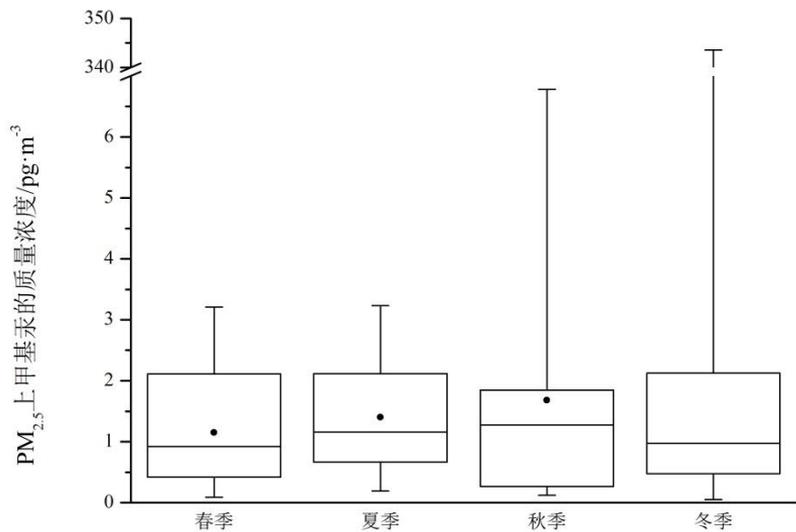


图3-6 不同季节PM_{2.5}上甲基汞的平均质量浓度 (n=28~31)

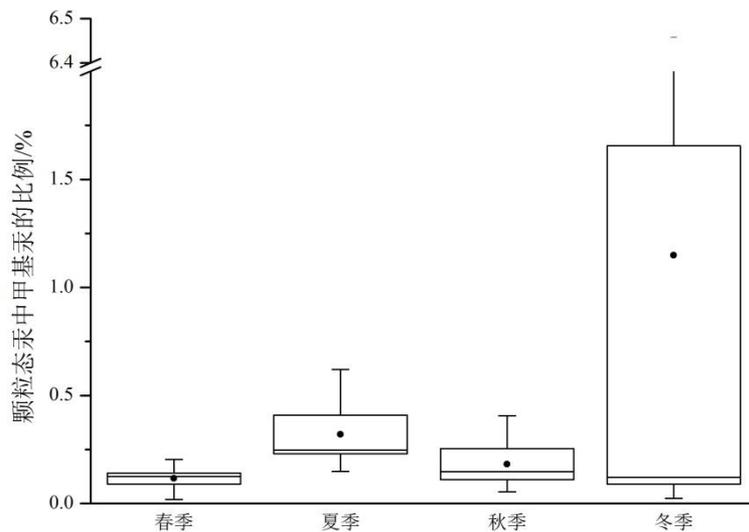


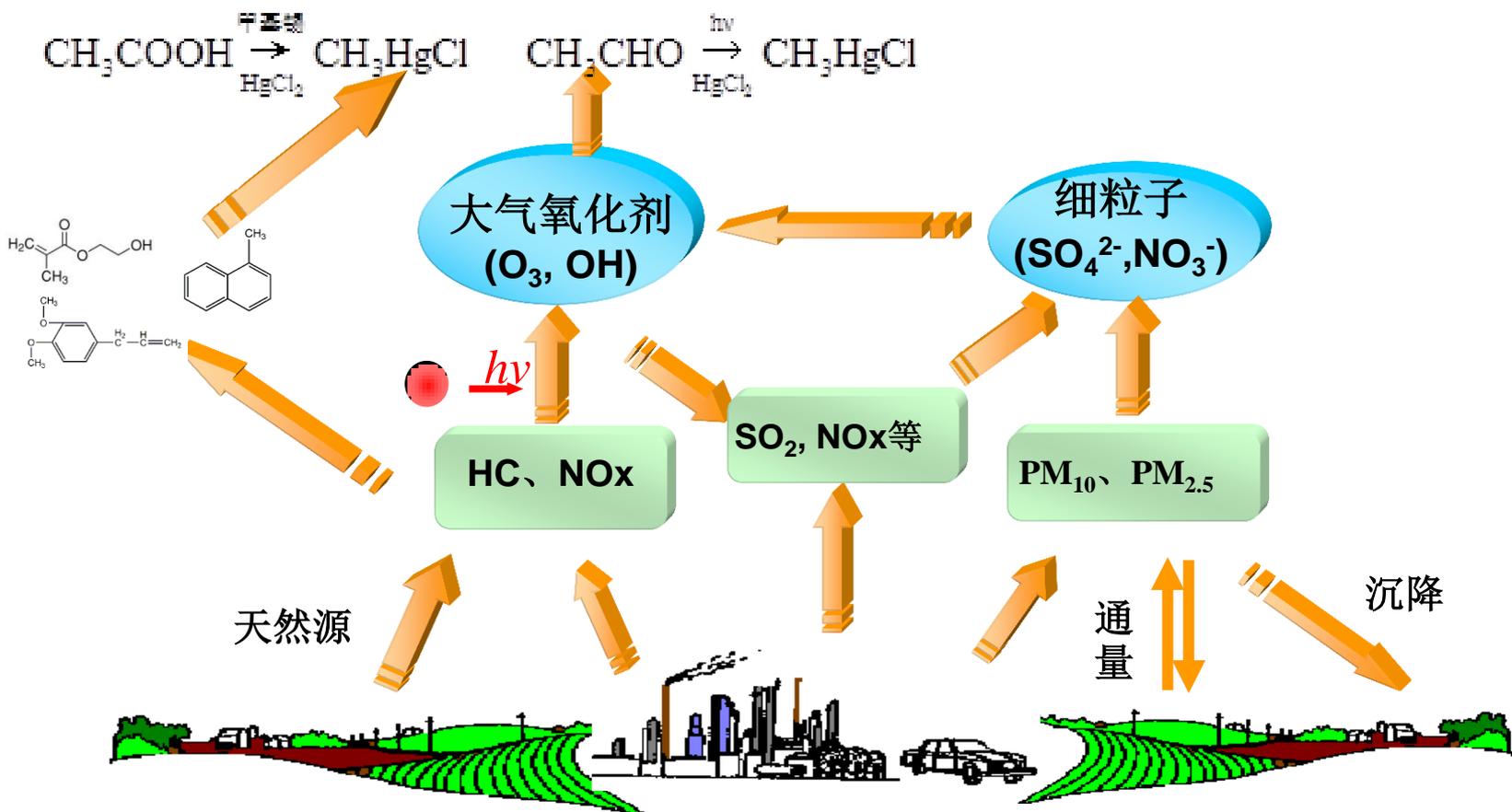
图3-7 不同季节PM_{2.5}上甲基汞占颗粒态汞的平均比例 (n=28~31)

甲基汞质量浓度：冬季>秋季>夏季>春季

颗粒态总汞中甲基汞比例：冬季>夏季>秋季>春季

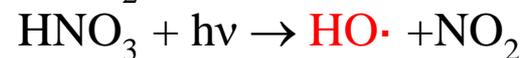
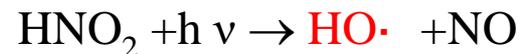
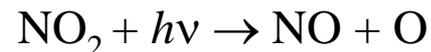
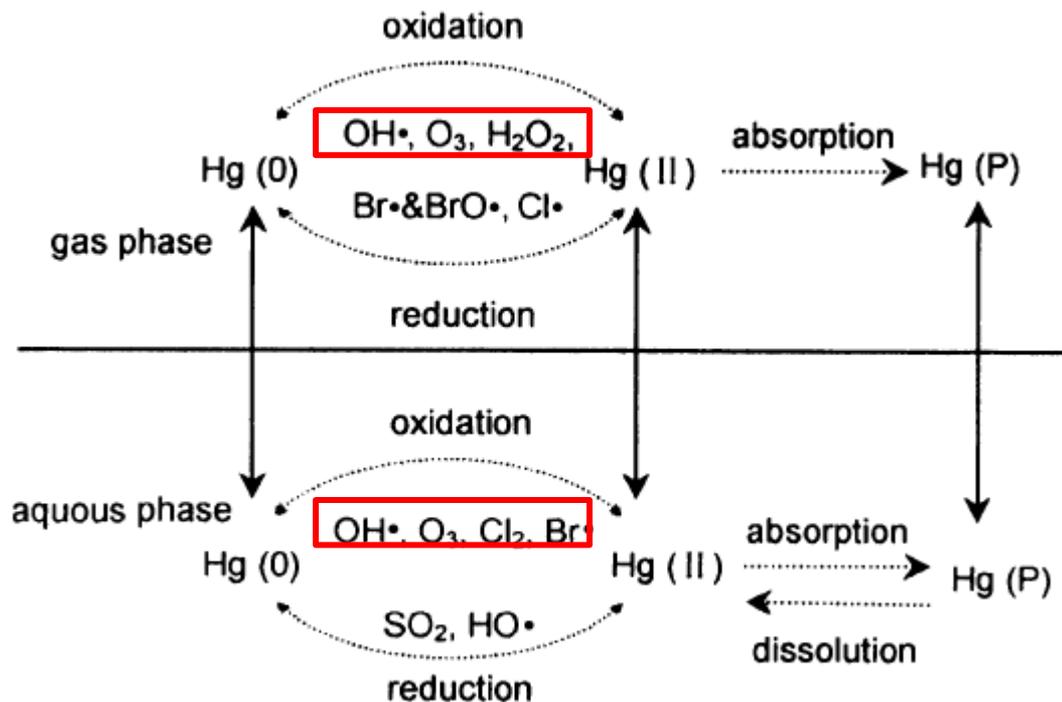


季节变化特征



夏季O₃浓度较高，光照强烈

冬季SO₂、NO_x、CH₄等一次污染物浓度较高，生成二次污染物，为汞的非生物甲基化提供甲基供体和自由基等有利条件。



气态单质汞与颗粒态汞的转化与SO₂、NO₂、O₃等常见大气污染物的浓度有关

表3-5 霾污染期间颗粒态总汞、颗粒态甲基汞和大气常见污染物、气象因素间的相关系数

	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃ -8小时	PM _{2.5}	PM _{2.5} -Hg	PM _{2.5} -MeHg	温度	湿度	能见度	风速
SO ₂	1											
NO ₂	0.509**	1										
PM ₁₀	0.523**	0.753**	1									
CO	0.538**	0.665**	0.837**	1								
O ₃ -8小时	-0.470**	-0.380**	-0.253	-0.522**	1							
PM _{2.5}	0.389**	0.679**	0.935**	0.878**	-0.337*	1						
PM _{2.5} -Hg	0.370**	0.709**	0.922**	0.861**	-0.317*	0.981**	1					
PM _{2.5} -MeHg	0.244**	0.559**	0.796**	0.822**	-0.322*	0.909**	0.890**	1				
温度	-0.589**	-0.335*	-0.178	-0.412**	0.906**	-0.224	-0.198	-0.200	1			
湿度	-0.437**	-0.125	0.052	0.158	-0.208	0.287*	0.271*	0.322*	-0.001	1		
能见度	-0.077	-0.340*	-0.526**	-0.526**	0.220	-0.617**	-0.631**	-0.540**	0.045	-0.392**	1	
风速	-0.124	-0.525**	-0.380**	-0.285*	0.167	-0.390**	-0.382**	-0.294*	0.143	-0.166	0.280*	1

表3-6 非霾污染期间颗粒态总汞、颗粒态甲基汞和大气常见污染物、气象因素间的相关系数

	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃ -8小时	PM _{2.5}	PM _{2.5} -Hg	PM _{2.5} -MeHg	温度	湿度	能见度	风速
SO ₂	1											
NO ₂	0.454**	1										
PM ₁₀	0.601**	0.286*	1									
CO	0.330*	0.314*	0.383**	1								
O ₃ -8小时	0.073	-0.109	0.349**	-0.140	1							
PM _{2.5}	0.634**	0.507**	0.690**	0.620**	0.166	1						
PM _{2.5} -Hg	0.423**	0.382**	0.557**	0.504**	-0.044	0.807**	1					
PM _{2.5} -MeHg	0.153	0.079	0.304*	0.105	0.402**	0.341**	0.454**	1				
温度	-0.266*	-0.144	-0.014	-0.228	0.662**	-0.186	-0.301*	0.289*	1			
湿度	-0.213	-0.161	-0.246	0.037	-0.193	0.025	0.133	0.023	-0.195	1		
能见度	0.051	-0.150	-0.016	-0.269	0.296*	-0.078	-0.086	0.193	0.272	-0.332*	1	
风速	0.098	0.082	0.011	0.222	-0.098	0.093	0.060	0.179	-0.075	-0.086	0.108	1

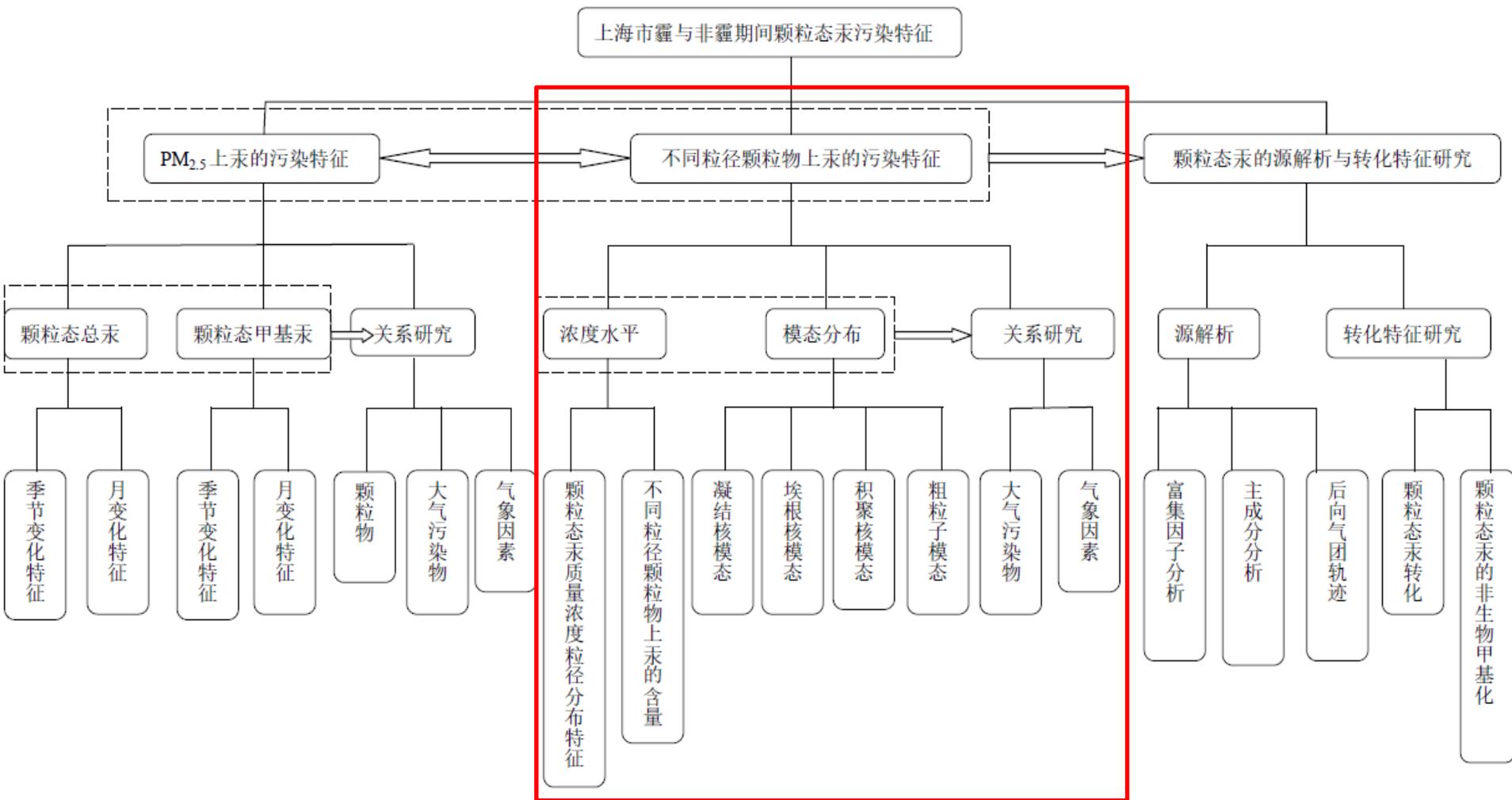
表3-5霾污染期间颗粒态总汞、颗粒态甲基汞和大气常见污染物、气象因素间的相关系数

	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃ -8小时	PM _{2.5}	PM _{2.5} -Hg	PM _{2.5} -MeHg	温度	湿度	能见度	风速
SO ₂	1											
NO ₂	0.509**	1										
PM ₁₀	0.523**	0.753**	1									
CO	0.538**	0.665**	0.837**	1								
O ₃ -8小时	-0.470**	-0.380**	-0.253	-0.522**	1							
PM _{2.5}	0.389**	0.679**	0.935**	0.878**	-0.337*	1						
PM _{2.5} -Hg	0.370**	0.709**	0.922**	0.861**	-0.317*	0.981**	1					
PM _{2.5} -MeHg	0.244**	0.559**	0.796**	0.822**	-0.322*	0.909**	0.890**	1				
温度	-0.589**	-0.335*	-0.178	-0.412**	0.906**	-0.224	-0.198	-0.200	1			
湿度	-0.437**	-0.125	0.052	0.158	-0.208	0.287*	0.271*	0.322*	-0.001	1		
能见度	-0.077	-0.340*	-0.526**	-0.526**	0.220	-0.617**	-0.631**	-0.540**	0.045	-0.392**	1	
风速	-0.124	-0.525**	-0.380**	-0.285*	0.167	-0.390**	-0.382**	-0.294*	0.143	-0.166	0.280*	1

表3-6非霾污染期间颗粒态总汞、颗粒态甲基汞和大气常见污染物、气象因素间的相关系数

	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃ -8小时	PM _{2.5}	PM _{2.5} -Hg	PM _{2.5} -MeHg	温度	湿度	能见度	风速
SO ₂	1											
NO ₂	0.454**	1										
PM ₁₀	0.601**	0.286*	1									
CO	0.330*	0.314*	0.383**	1								
O ₃ -8小时	0.073	-0.109	0.349**	-0.140	1							
PM _{2.5}	0.634**	0.507**	0.690**	0.620**	0.166	1						
PM _{2.5} -Hg	0.423**	0.382**	0.557**	0.504**	-0.044	0.807**	1					
PM _{2.5} -MeHg	0.153	0.079	0.304*	0.105	0.402**	0.341**	0.454**	1				
温度	-0.266*	-0.144	-0.014	-0.228	0.662**	-0.186	-0.301*	0.289*	1			
湿度	-0.213	-0.161	-0.246	0.037	-0.193	0.025	0.133	0.023	-0.195	1		
能见度	0.051	-0.150	-0.016	-0.269	0.296*	-0.078	-0.086	0.193	0.272	-0.332*	1	
风速	0.098	0.082	0.011	0.222	-0.098	0.093	0.060	0.179	-0.075	-0.086	0.108	1

技术路线图





颗粒物分级采集

采样仪器：nano-moudi 13级大气颗粒物采样器

采样时间：2013年12月

样品分析

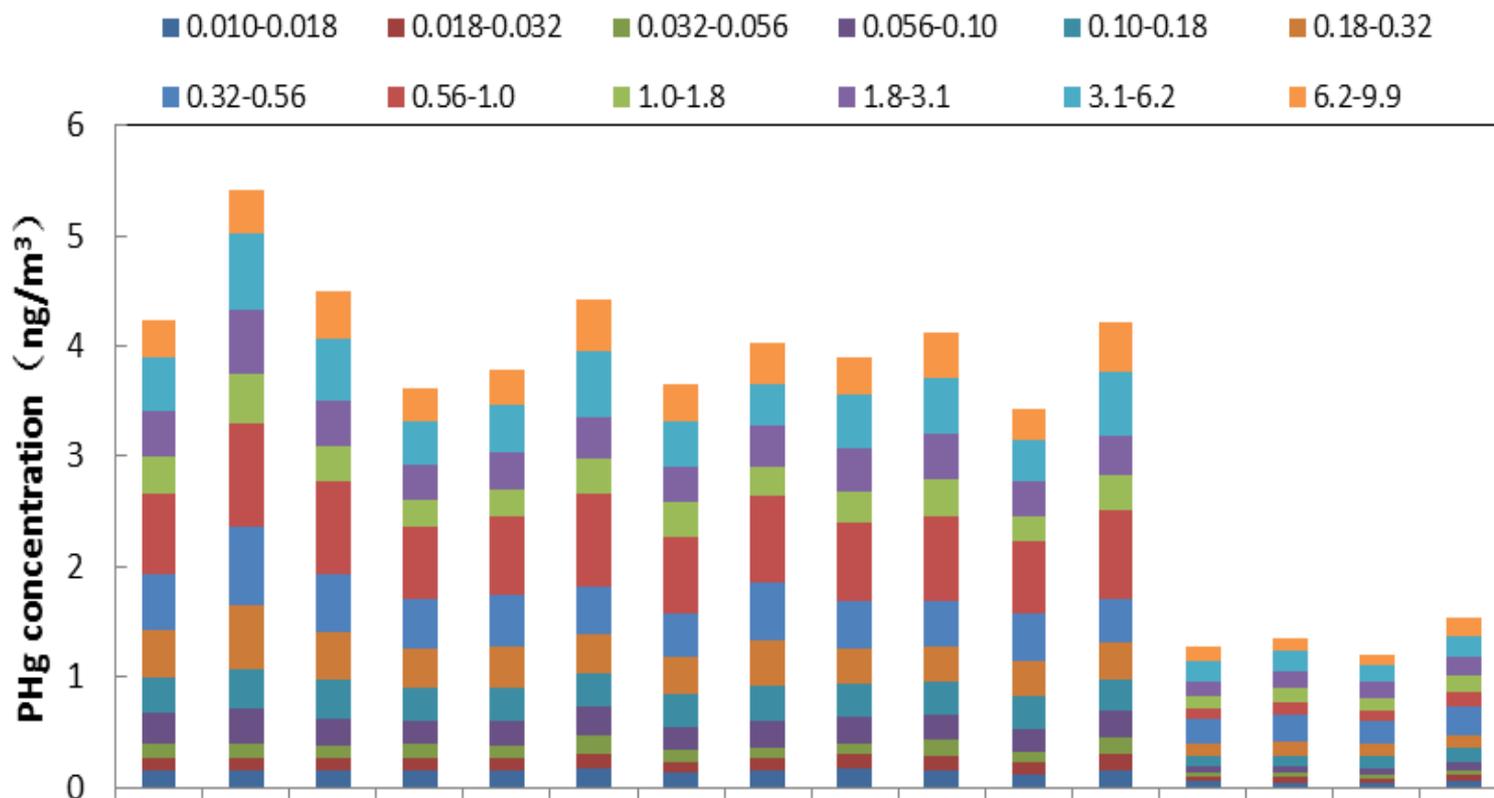
总汞测定：

微波消解-电感耦合等离子质谱（ICP-MS）法



编号	粒径范围 (nm)
M1	9900~18000
M2	6200~9900
M3	3100~6200
M4	1800~3100
M5	1000~1800
M6	560~1000
M7	320~560
M8	180~320
M9	100~180
M10	57~100
nM1	32~57
nM2	18~32
nM3	10~18

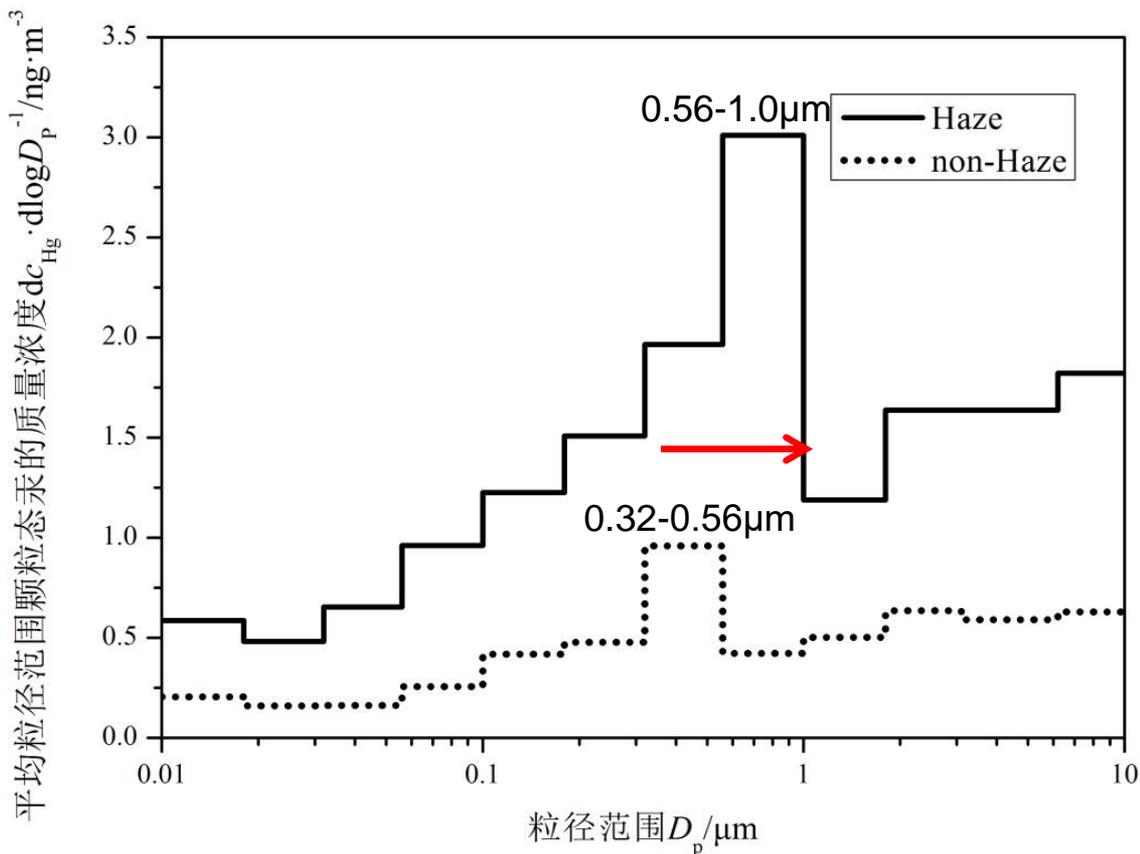
颗粒汞的粒径分布



- 霾天 (n=12, 4.1ng/m³) 汞浓度是非霾天 (n=4, 1.3ng/m³) 的3倍。
- 0.56-1.0 μm, 霾天是非霾天的 7.13倍; 其余粒径, 霾天是非霾天的 3倍。



质量浓度



霾期间颗粒态汞随粒径分布情况与非霾期相比略向大粒径方向偏移，这说明了灰霾时颗粒态汞在积聚成长



质量浓度

表4-2 霾与非霾期间不同粒径颗粒态汞和颗粒物的平均质量浓度 (ng m⁻³和μg m⁻³)

粒径分布 (μm)		0.010-0.018	0.018-0.032	0.032-0.056	0.056-0.10	0.10-0.18	0.18-0.32	0.32-0.56	0.56-1.0	1.0-1.8	1.8-3.1	3.1-6.2	6.2-9.9
颗粒态汞	Haze	0.15	0.12	0.16	0.24	0.31	0.38	0.48	0.76	0.30	0.39	0.49	0.37
	Non-haze	0.05	0.04	0.04	0.06	0.11	0.12	0.23	0.11	0.13	0.15	0.18	0.13
	增长因子	2.87	3.03	4.03	3.75	2.94	3.17	2.05	7.13	2.37	2.58	2.78	2.90

霾天0.032~0.056μm粒径范围的颗粒态汞增长最为迅速

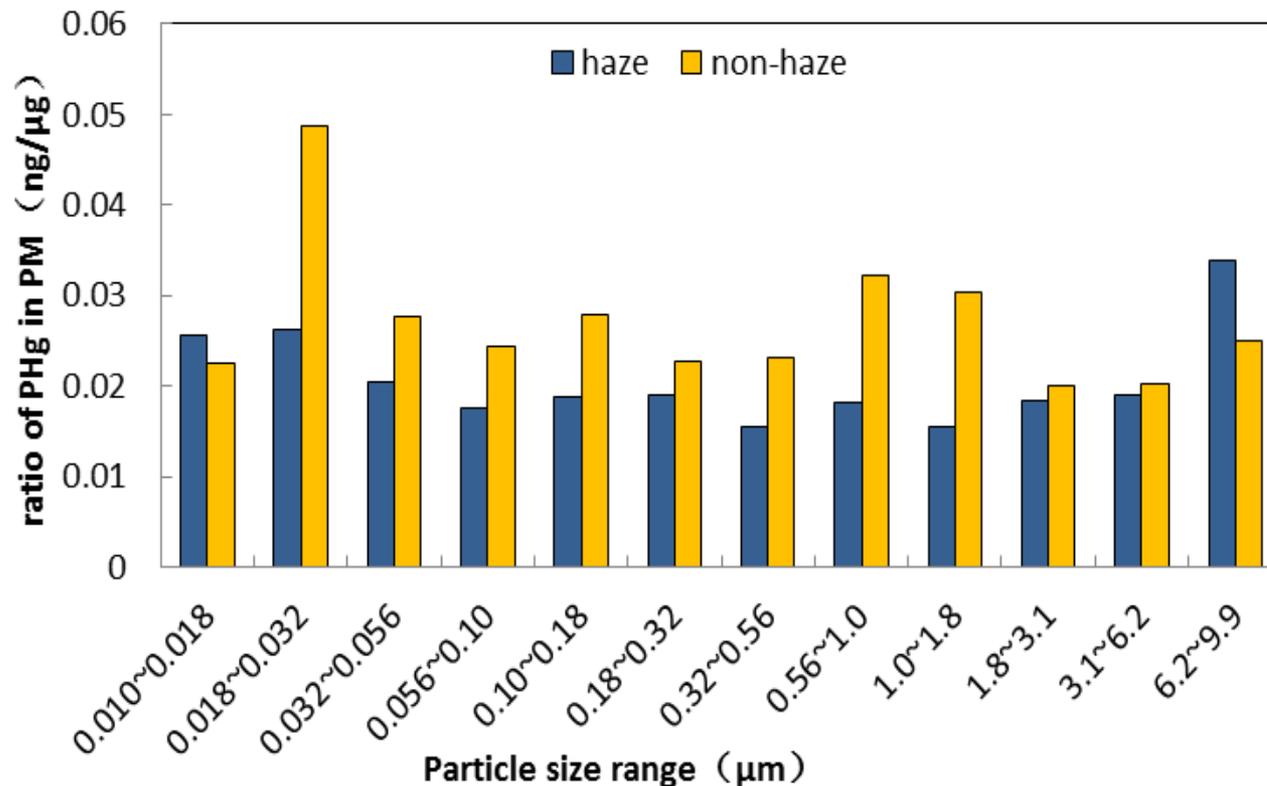
表4-3 霾与非霾期间不同粒径范围之间颗粒态汞的比例

比例/%	PM ₁ /PM ₁₀	PM ₁ /PM ₁₀	PM _{0.1-1.0} /PM ₁	PM _{0.01-0.1} /PM ₁
Haze	37.35	62.65	74.20	25.80
Non-haze	43.70	56.30	74.27	25.73

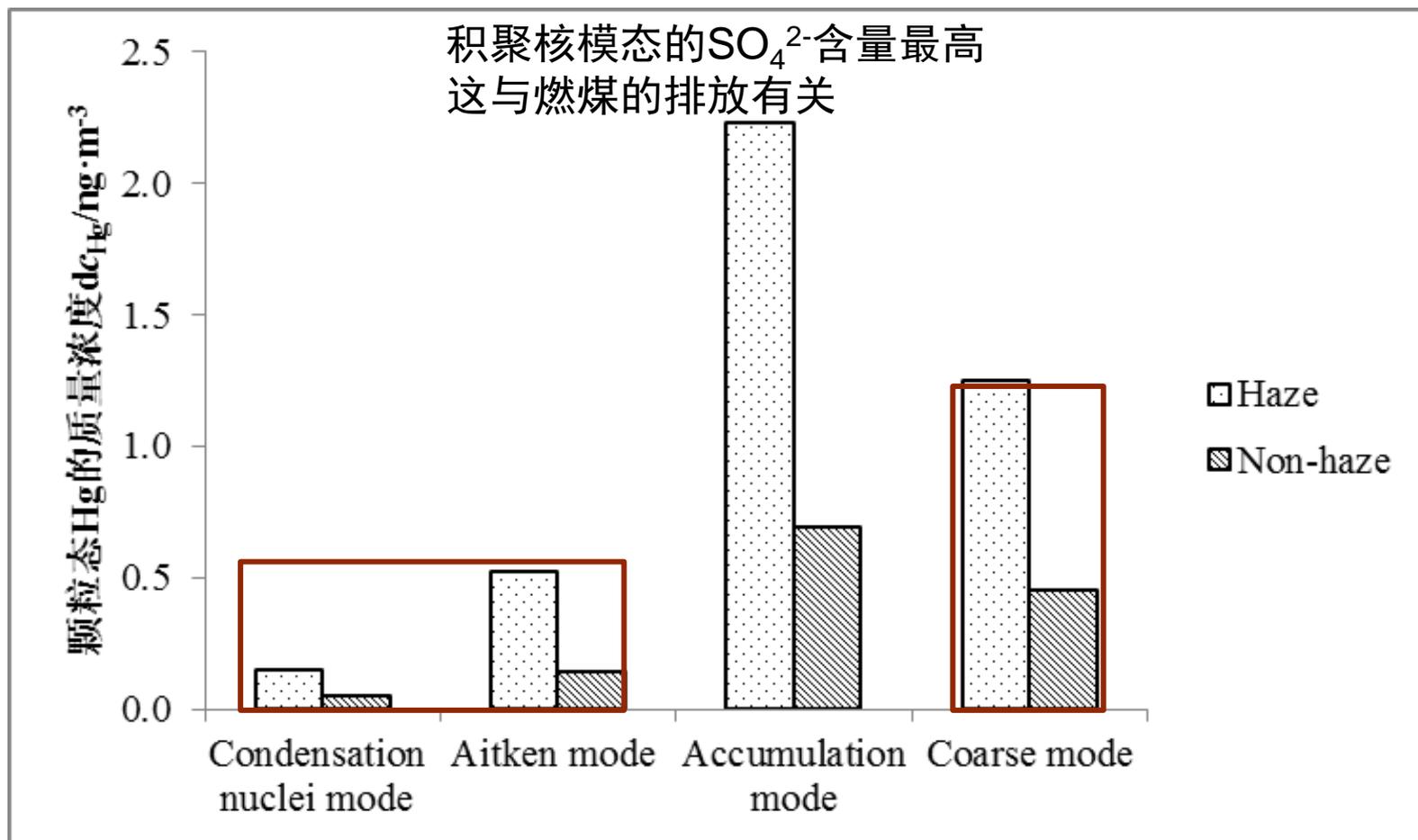
颗粒态汞主要分布在超细粒子上



含量



霾污染其他污染物的成长速度较快，而汞的成长相对滞后



燃煤、机动车尾气排放量以及风沙扬尘增高

颗粒物与颗粒态汞

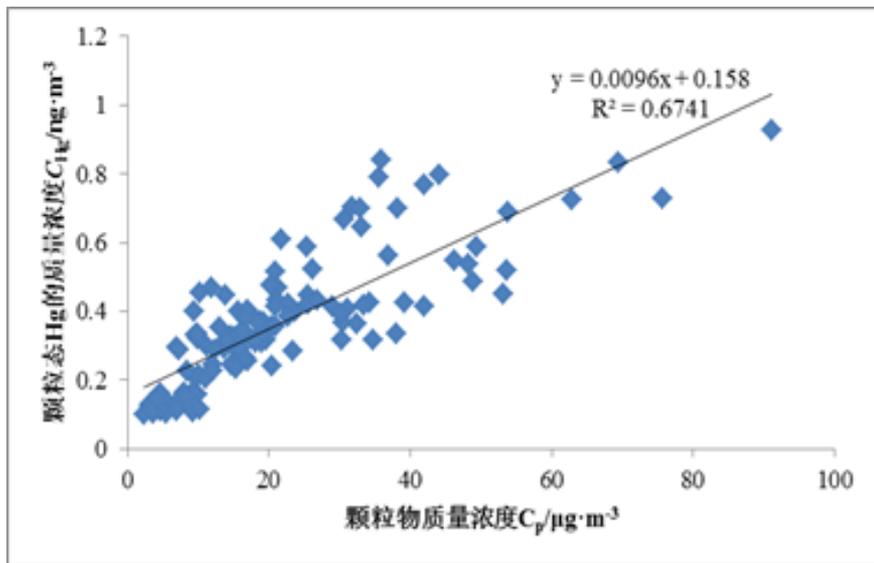


图4-8 霾期间颗粒物质量浓度和颗粒态汞质量浓度的关系

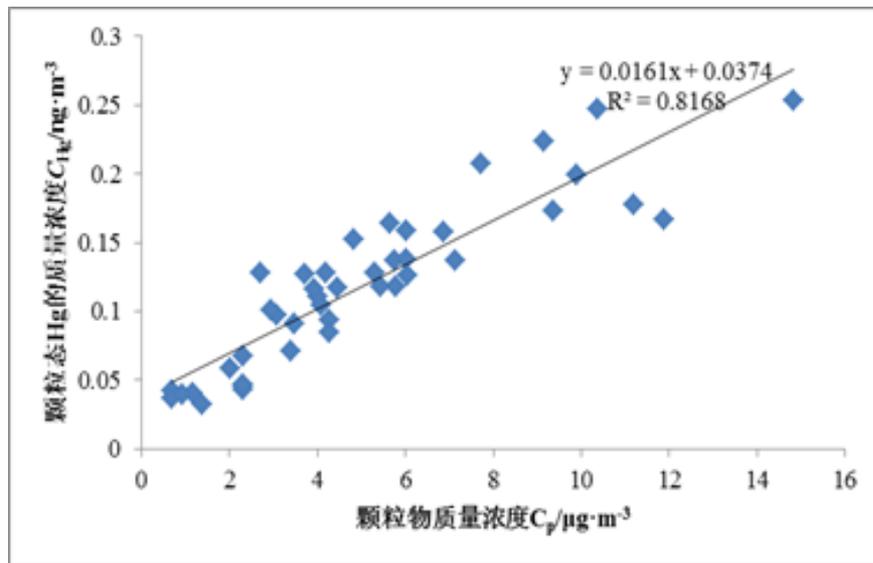


图4-9 非霾期间颗粒物质量浓度和颗粒态汞质量浓度的关系

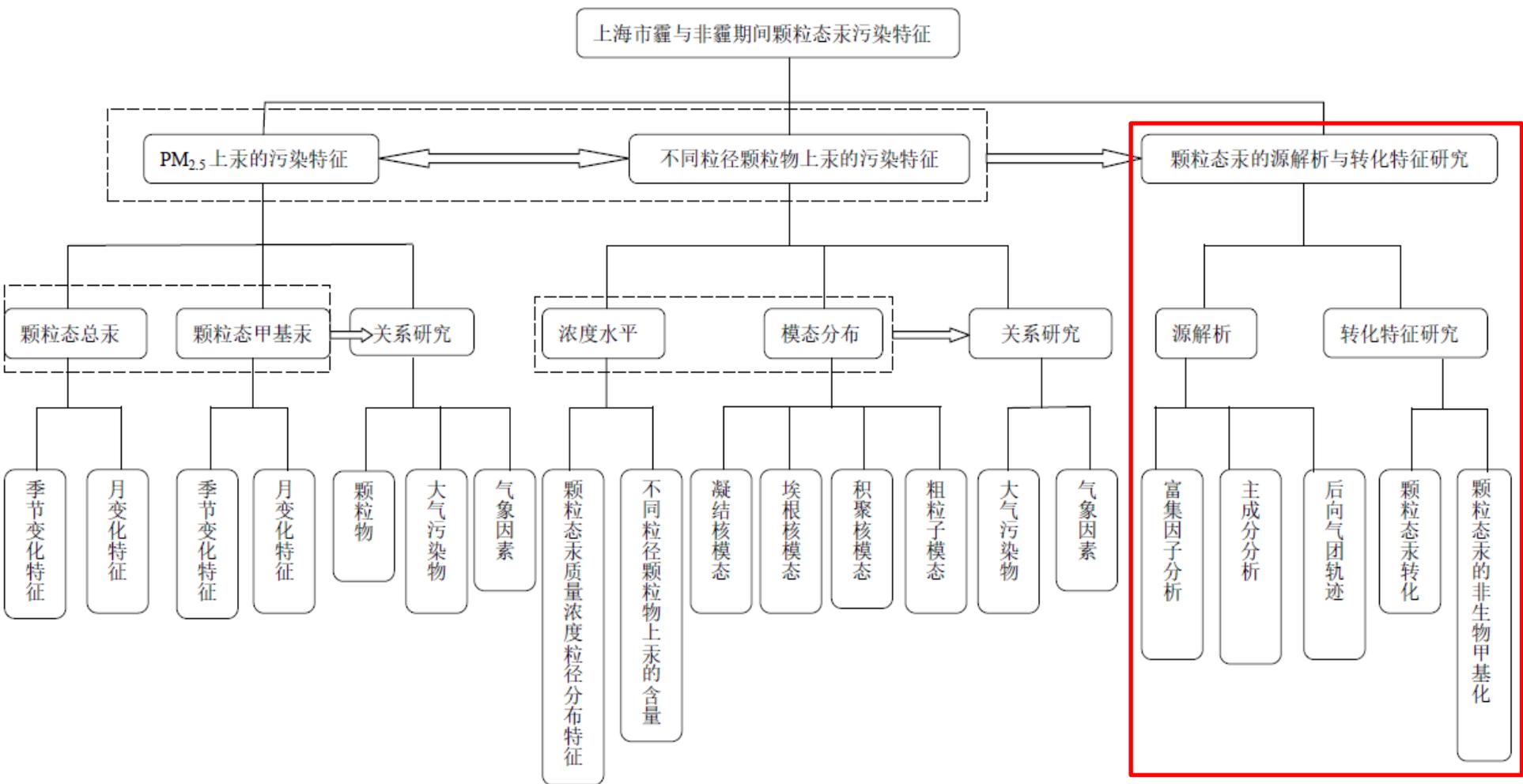
为颗粒汞参与了颗粒物的成长提供了科学依据
细颗粒物是汞吸附和转化的重要场所

与大气常见污染物、气象因素的关系

表4-6 不同模态颗粒态汞与大气污染物、气象因素的相关性

	凝结核模态	埃根核模态	积聚核模态	粗粒子态	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	气温	湿度	风速	气态汞
凝结核模态	1											
埃根核模态	0.870**	1										
积聚核模态	0.955**	0.916**	1									
粗粒子态	0.974**	0.920**	0.958**	1	污染物排放的当日颗粒态汞尚未成长							
SO ₂	0.556	0.445	0.442	0.424	1							
NO ₂	0.891**	0.799*	0.864**	0.845**	0.520	1						
CO	0.879**	0.822*	0.874**	0.879**	0.647	0.725*	1					
O ₃	-0.060	0.058	0.063	0.012	-0.649	0.153	-0.381	1				
气温	0.325	0.463	0.464	0.459	-0.494	0.357	0.109	0.820*	1			
湿度	0.022	0.135	0.182	0.190	-0.549	-0.183	0.199	0.125	0.467	1		
风速	-0.735	-0.667	0.848**	-0.748*	-0.134	-0.777*	-0.655	-0.352	-0.645	-0.300	1	
气态汞	0.358	0.495	0.222	0.340	0.653	0.302	0.334	-0.374	-0.260	-0.502	0.244	1

技术路线图





● 颗粒物分级采集

采样仪器：nano-moudi 13级大气颗粒物采样器

采样时间：2013年12月

● 样品分析

水溶性离子的测定：采用离子色谱法

金属元素的测定：5mlHNO₃-5mlHCl-2mlH₂O₂混酸体系进行微波消解-电感耦合等离子质谱法（ICP-MS）

富集因子分析

$$(EF)_i = \frac{(c_i/c_n)_{\text{气溶胶}}}{(c_i/c_n)_{\text{土壤背景}}}$$

式中, C_i ——i 元素的质量浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;

C_n ——参比元素的质量浓度 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;

气溶胶——大气颗粒物中测得的含量

土壤背景——区域土壤背景值中的含量

$EF < 1$ 自然来源

$1 < EF < 10$ 既有自然来源, 又有人为来源

$EF > 10$ 主要为人为来源

大气汞主要来自于人为活动, 其中霾天受人为活动的影响程度大于非霾天

	Haze	Non-haze
As	434.6	142.6
B	879.0	534.1
Ba	27.5	23.4
Be	17.6	4.7
Bi	1102.5	302.6
Cd	3880.1	1180.4
Co	31.9	11.9
Cu	191.5	36.6
Cr	38.8	11.4
Cs	40.9	27.0
Fe	3.2	1.9
Ga	106.1	53.3
Li	112.3	69.3
Mn	17648.1	16292.8
Ni	122.5	40.1
Pb	892.2	283.8
Rb	6.5	2.0
Se	10975.6	2513.5
Sn	2154.9	1441.6
Sr	24.6	23.0
Te	1347.8	440.7
Tl	2636.0	787.4
Zn	823.1	291.0

主成分分析

利用降维的思想，将关系紧密的变量删去，留下两两不相关的新变量。利用SPSS 19.0软件计算金属元素特征值，选出特征值大于1的成分作为主成分进行分析，得到在主成分上的负荷值表。

第一因子 燃煤和冶金化工排放，贡献率大于50%

第二因子 土壤扬尘和垃圾焚烧，贡献率5%左右

元素	成份	
	1	2
Al	0.956	-0.268
As	0.981	0.081
B	0.971	0.174
Ba	0.986	0.005
Be	0.967	-0.145
Bi	0.919	0.066
Cd	0.973	-0.080
Co	0.985	-0.116
Cu	0.982	0.129
Cr	0.981	-0.009
Cs	0.985	-0.160
Fe	0.943	0.327
Ga	0.976	-0.185
Li	0.894	0.317
Mn	0.990	-0.086
Ni	0.984	0.033
Pb	0.986	-0.064
Rb	0.913	0.318
Se	0.968	-0.172
Sn	0.987	-0.135
Sr	0.971	-0.002
Te	0.938	-0.306
Tl	0.958	-0.150
Zn	0.795	0.578

后向气团轨迹

利用 HYSPLIT 模型对颗粒态汞进行 72h 溯源分析

霾污染前气团来自于西北、福建等地区

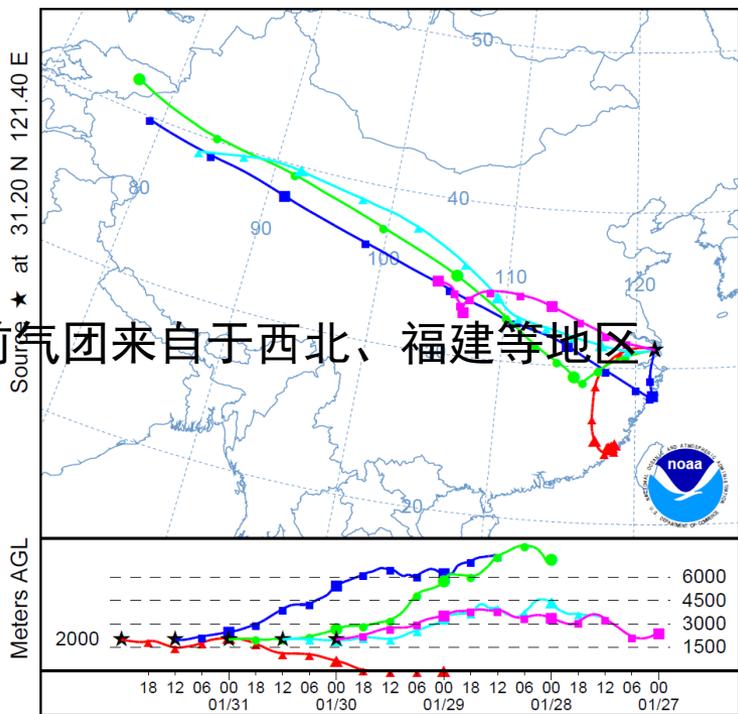


图 5-4 2013 年上海冬季霾污染后的后向气团轨迹图

霾污染期间气团来自于北方地区

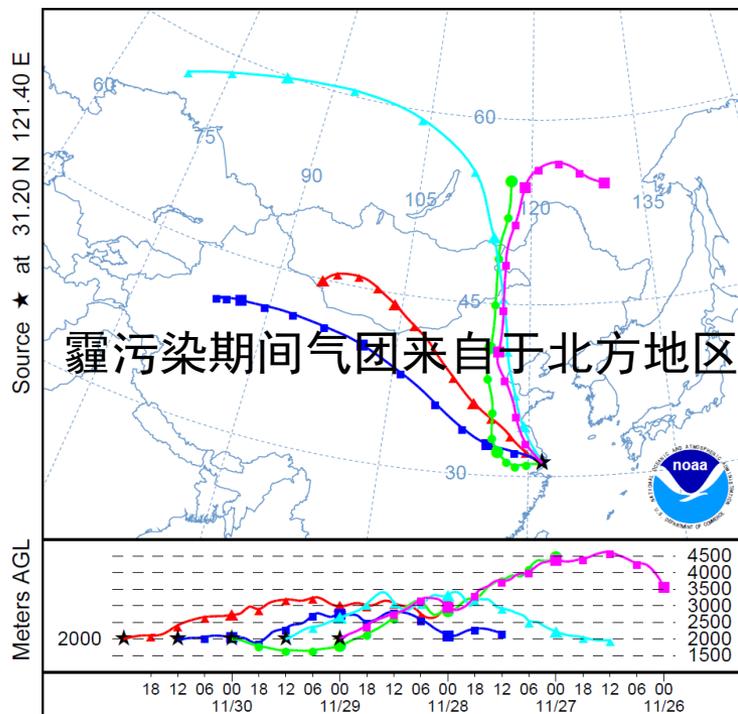


图 5-3 2013 年上海冬季霾污染期间的后向气团轨迹图

颗粒态汞的转化

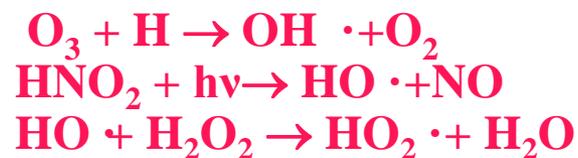
反应类型	编号	反应方程式	参考文献
气相反应	A1	$\text{Hg}^0(\text{g}) + \text{O}_3(\text{g}) \rightarrow \text{HgO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$	[101]
	A2	$\text{Hg}^0(\text{g}) + \text{NO}_3(\text{g}) \rightarrow \text{HgO}(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g})$	[101]
	A3	$\text{Hg}^0(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{Hg}(\text{OH})_2(\text{g})$	[101]
	A4	$\text{Hg}^0(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{HgCl}_2(\text{g})$	[102]
	A5	$\text{Hg} + \text{Br}\cdot \rightarrow \text{HgBr}\cdot$	[103]
	A6	$\text{HgBr}\cdot + \text{X} \rightarrow \text{HgBrX} (\text{X} = \text{Br}, \text{OH})$	[103]
	A7	$\text{Hg} + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{HgOH}\cdot$	[101]
液相反应	Q1	$\text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{O}_3(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + \text{O}_2(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq})$	[101]
	Q2	$\text{Hg}^0(\text{aq}) + 2\text{OH}\cdot(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$	[101]
	Q3	$\text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{OCl}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + \text{O}^{2-}(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$	[104]
	Q4	$\text{HO}_2\cdot(\text{aq}) + \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^+(\text{aq}) + \text{O}_2(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq})$	[101]
	Q5	$\text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{HOCl}(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq})$	[104]
	Q6	$\text{Hg}(\text{OH})_2(\text{aq}) \xrightarrow{h\nu} \text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{product}$	[101]
	Q7	$\text{HgSO}_3(\text{aq}) \xrightarrow{h\nu} \text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{SO}_2 + \text{O}_3$	[104]

项目	霾天	非霾天
$\text{SO}_2/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	38.27 ± 18.74	25.27 ± 16.16
$\text{NO}_2/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	84.93 ± 21.68	54.93 ± 12.77
$\text{CO}/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.28 ± 0.33	0.87 ± 0.30
$\text{O}_3\text{-8小时}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	87.07 ± 29.54	70.93 ± 20.95
$\text{PM}_{2.5}\text{-Hg}/\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	1.29 ± 0.54	0.62 ± 0.29

霾天气态汞向活性气态汞的转化速率提高

颗粒态汞的转化

反应类型	编号	反应方程式	参考文献
气相反应	A1	$\text{Hg}^0(\text{g}) + \text{O}_3(\text{g}) \rightarrow \text{HgO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$	[101]
	A2	$\text{Hg}^0(\text{g}) + \text{NO}_3(\text{g}) \rightarrow \text{HgO}(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g})$	[101]
	A3	$\text{Hg}^0(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{Hg}(\text{OH})_2(\text{g})$	[101]
	A4	$\text{Hg}^0(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{HgCl}_2(\text{g})$	[102]
	A5	$\text{Hg} + \text{Br}\cdot \rightarrow \text{HgBr}\cdot$	[103]
	A6	$\text{HgBr}\cdot + \text{X} \rightarrow \text{HgBrX} \text{ (X = Br, OH)}$	[103]
	A7	$\text{Hg} + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{HgOH}\cdot$	[101]
液相反应	Q1	$\text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{O}_3(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + \text{O}_2(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq})$	[101]
	Q2	$\text{Hg}^0(\text{aq}) + 2\text{OH}\cdot(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$	[101]
	Q3	$\text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{OCl}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + \text{O}^{2-}(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$	[104]
	Q4	$\text{HO}_2\cdot(\text{aq}) + \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^+(\text{aq}) + \text{O}_2(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq})$	[101]
	Q5	$\text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{HOCl}(\text{aq}) \rightarrow \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq})$	[104]
	Q6	$\text{Hg}(\text{OH})_2(\text{aq}) \xrightarrow{h\nu} \text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{product}$	[101]
	Q7	$\text{HgSO}_3(\text{aq}) \xrightarrow{h\nu} \text{Hg}^0(\text{aq}) + \text{SO}_2 + \text{O}_3$	[104]

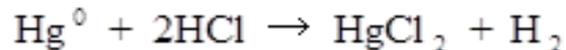
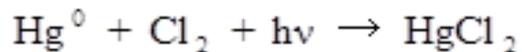
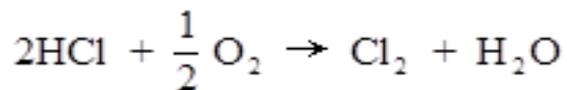


Q2的反应常数为 $2 \times 10^9 \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
 远大于Q4的反应常数
 $1.7 \times 10^4 \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，因此霾污染
 期间大气中汞的转化仍以零价汞氧
 化为活性二价汞为主。

颗粒态汞的转化

表 5-7 霾与非霾期间颗粒态汞与水溶性离子的相关系数

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
非霾	0.852	0.968	0.973	0.774	0.692	0.891	0.929	0.961
霾	0.293	0.233	0.630	0.845	0.618	0.929	0.942	0.973



颗粒态汞浓度与Cl⁻相关性极强，霾天相关性更强，与霾天较高的湿度下液相反应强烈有关

项目	霾天	非霾天
湿度/%	59.87 ± 13.63	56.87 ± 15.77

颗粒态汞的转化

表 5-7 霾与非霾期间颗粒态汞与水溶性离子的相关系数

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
非霾	0.852	0.968	0.973	0.774	0.692	0.89	0.929	0.961
霾	0.293	0.233	0.630	0.845	0.618	0.929	0.942	0.973

汞的排放与燃煤机动车尾气的排放有关

硝酸经过光解可以生成OH： $\text{HNO}_3 + \text{h}\nu \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH} \cdot$

SO₄²⁻、NO₃⁻含量的增加，将会使颗粒物中HgSO₄、HgSO₃、HgNO₃和HgS浓度增加，从而改变颗粒物中汞赋存的形态

主要结论

- ① 细颗粒中的总汞和甲基汞呈明显的季节变化性，即冬季>春季>秋季>夏季的趋势，较低的温度有利于颗粒物对汞的吸附
- ② 颗粒态汞主要分布在细粒子上，霾污染过程中颗粒态汞在积聚成长，颗粒态汞参与了颗粒物的成长
- ③ 霾天汞在大气中气相和液相氧化反应速率高，甲基供体、自由基浓度较高，颗粒态汞浓度增加、促进汞非生物甲基化

- ④ 对颗粒物中汞不同的存在形态的研究，因此对于大气汞的循环特征和来源无法作出深入研究。
 - ④ 对于霾复合污染大气各污染物间复杂的反应机制的研究不够深入，因此很难详尽的阐述霾污染期间大气颗粒态汞形成转化机制的变化。
 - ④ 对于霾污染期间大气汞的循环特征研究，还需要分析大气汞的干/湿沉降通量，进行沉降实验。
-



上海交通大學
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

Thank you!
