

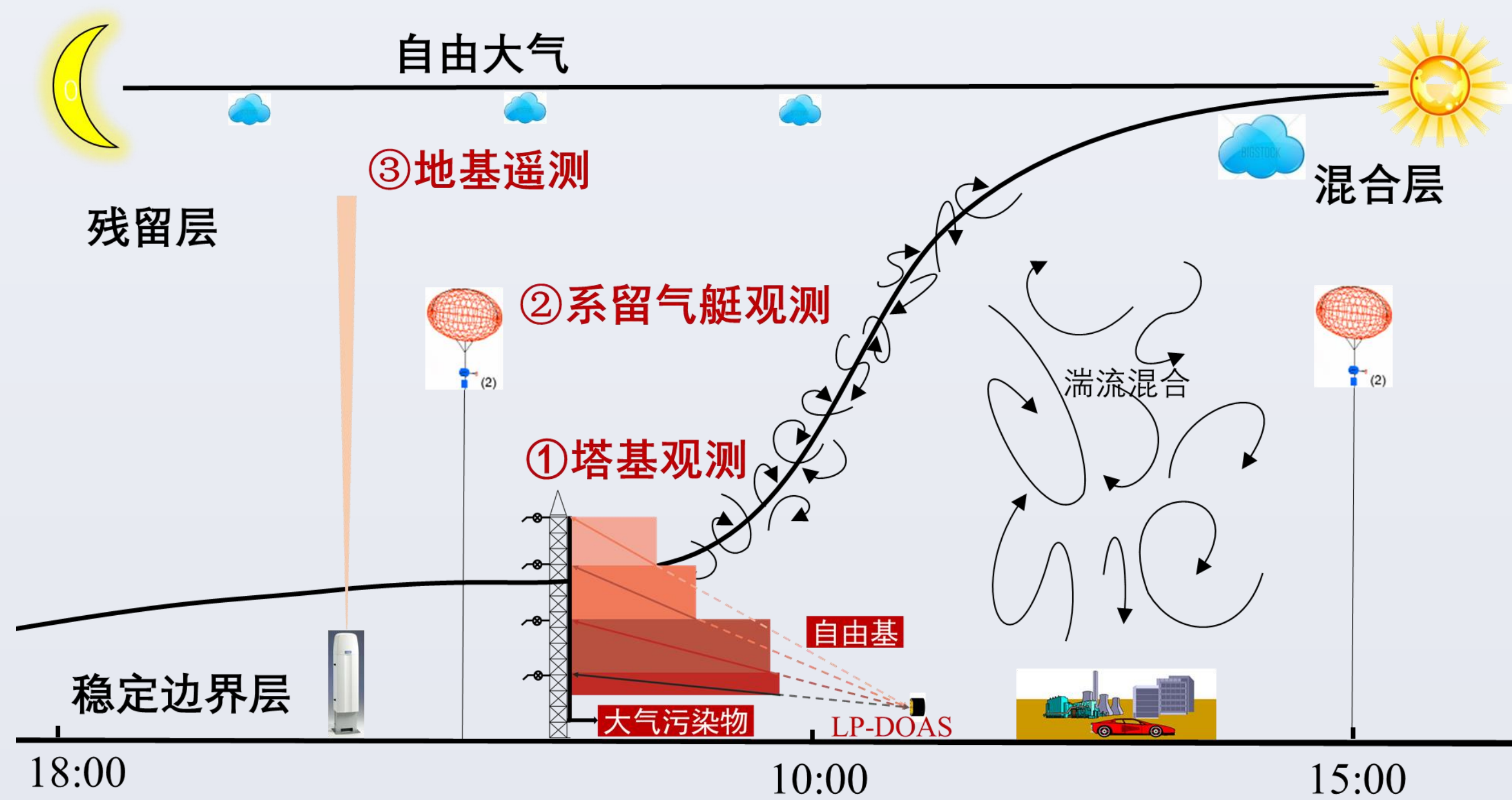
大气边界层理化结构垂直演变

唐贵谦, 王迎红, 王跃思等

中国科学院大气物理研究所中国生态系统研究网络大气科学分中心

大气边界层理化结构垂直探测系统

以中国科学院大气物理研究所325 m铁塔为基础, 发展了激光云高仪反演大气边界层高度的技术方法(Tang et al., 2016; Zhu et al., 2018a, b)、开发了气路、塔上平台和光路三种手段的铁塔梯度分层采样和分析技术(Yan et al., 2021; Kang et al., 2021)、研制了VOCs远程遥控梯度采样技术(Wu et al., 2020; 2021)。以多项关键技术为基础, 联合中国科学技术大学和复旦大学构建了涵盖地基遥测、塔基梯度观测和系留气艇探测等多种手段的垂直探测平台, 形成高度互补的大气边界层理化结构垂直探测系统, 实现了常规气象要素、大气边界层高度、痕量污染气体、颗粒物化学组分及大气自由基的垂直探测。该系统弥补了大气污染物地面观测网络的不足, 获取了大量的垂直梯度观测数据, 近五年共计发表论文40余篇, 具体凝练成以下3项核心成果。



技术平台

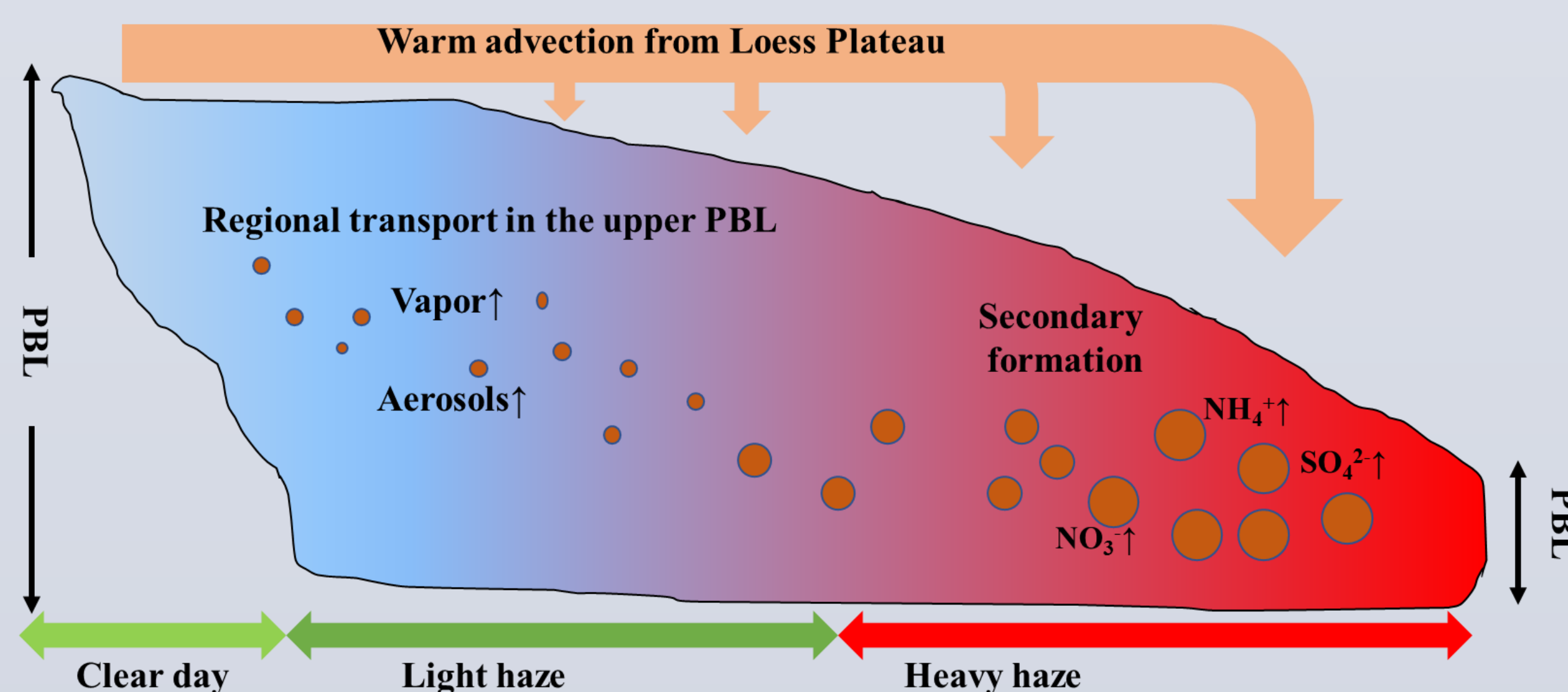
- 地基高塔垂直探测 → 0 - 300 m
- 系留气艇垂直探测 → 0 - 1500 m
- 地基遥测垂直探测 → 200 - 15000 m

关键技术

- 云高仪反演边界层高度方法
- 铁塔梯度分层采样技术方法
- VOCs遥控梯度采样方法

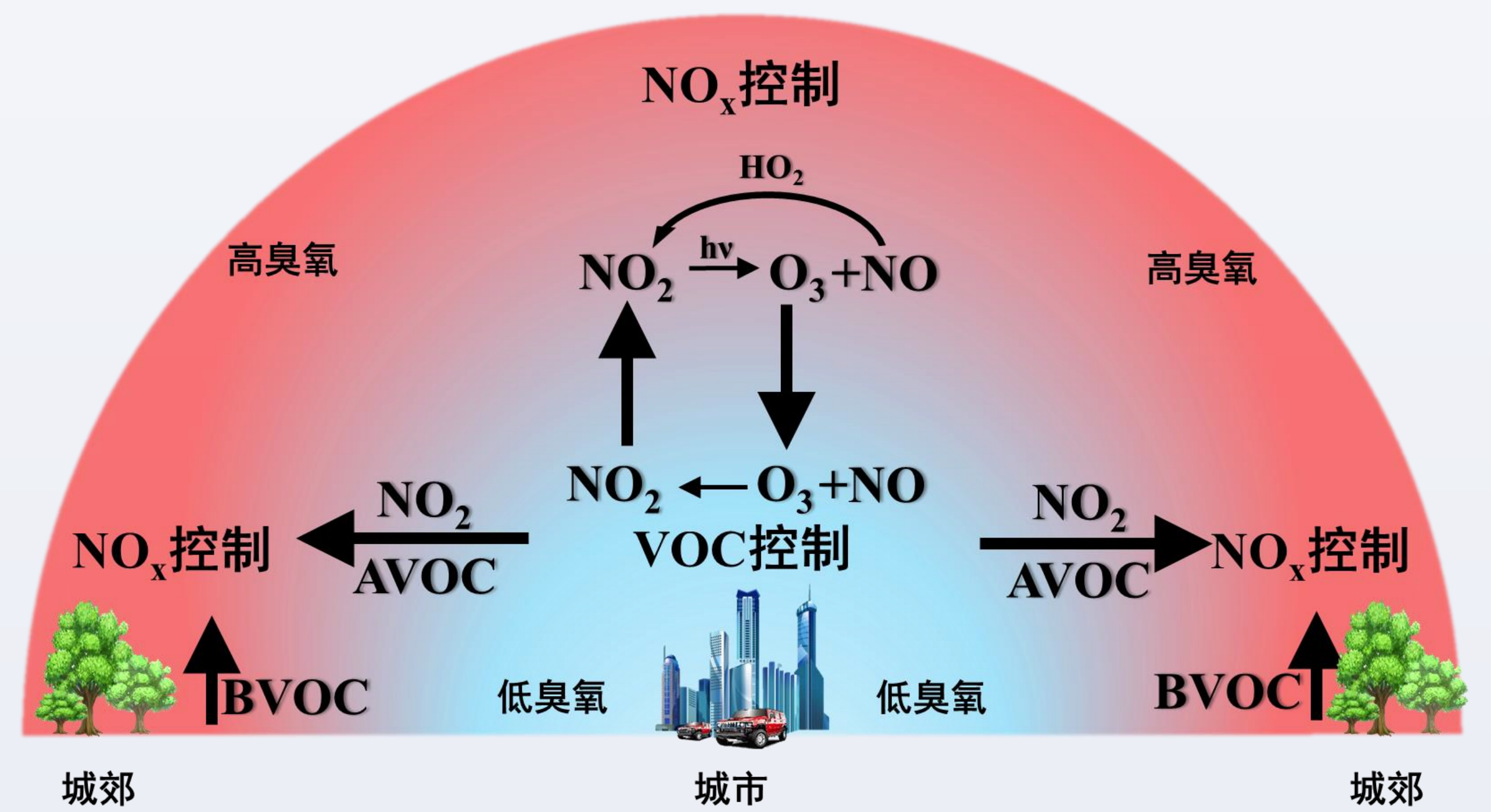
核心成果1: 区域水平输送对重霾污染的作用

传统研究认为, 北京地区重污染时段通常由强输送过程导致。本研究发现, 区域水平输送在不同污染程度下的作用有显著差异。大气污染形成初期, 北京地区主要受区域输送影响, 气态前体物、纳米级粒子和水汽在500~1000 m高度上沿偏南气流向北京输送。当污染过程一旦形成, 受黄土高原暖平流的影响, 混合层高度会迅速降低至原来1/3甚至更多, 区域输送基本终止。但由于扩散能力降低, 污染物在近地面高度压缩, 其浓度迅速升高。同时, 污染初期输送而来的气态前体物和水汽以纳米级粒子为凝结核, 在吸湿增长和非均相化学过程作用下促使二次粒子爆发式增长, 从而导致污染进一步加剧(Tang et al., 2015; Zhu et al., JGR, 2016; Liu et al., ACP, 2019; Liu, et al., EP, 2021)。因此, 北京重霾污染形成机制的结论为“北京重霾污染形成于周边以燃煤工业排放为主的污染物输送, 而加强于本地以机动车排放为主的污染物叠加”。根据此项研究成果, 须在重霾污染过程来临的前2-3天提前预警, 对区域固定源、特别是高架源进行提前管控。随后, 进一步限制本地污染源排放, 才可能使污染峰值得到有效遏制。



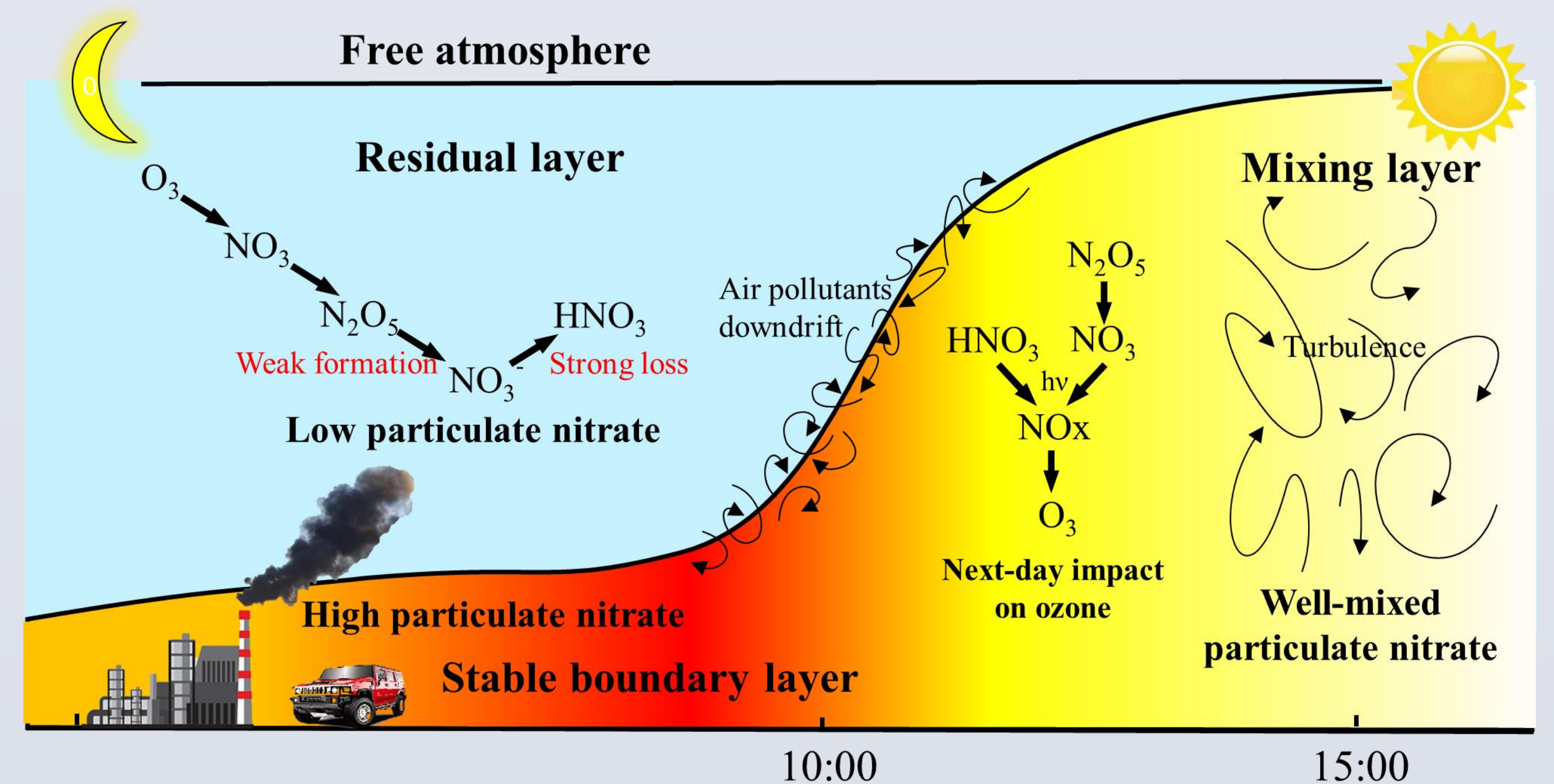
核心成果2: 污染物垂直交换对臭氧污染的作用

传统研究认为, 低边界层高度对应的静稳天气是臭氧污染高发的主要天气条件, 且城市地区臭氧生成多受VOCs控制。本研究发现, 华北平原区域城市近地面为O₃的汇, O₃的净生成区域在边界层上部。由于边界层上部O₃浓度显著高于近地面, 近地面和边界层上部在垂直方向存在快速的循环机制, 且自由对流强度越大, 臭氧污染越重(Zhao et al., 2019; Tang et al., 2021b)。这一循环机制不仅导致臭氧生成敏感性在强自由对流状态下呈现NO_x控制状态, 而且还会导致垂直方向上臭氧生成敏感性从VOCs敏感逐渐过渡到NO_x敏感(Tang et al., AR, 2017a, b)。依据此项研究发现, 严重光化学污染时段只控制VOCs虽然可以降低近地面O₃生成, 但边界层内O₃的柱浓度下降有限, 这表明NO_x的协同控制是控制区域大气光化学污染的必要手段。北京作为先行者, 虽然VOCs仍未得到有效控制, 但随着NO_x的深度减排, 臭氧稳定降低。这一研究论证了全国大幅减排NO_x控制臭氧的可行性, 为我国后续臭氧和颗粒物协同防控提供了先行经验(Tang et al., 2021a)。



核心成果3: 夜间不同大气层结硝酸盐生成机制

近年来, 虽然大气颗粒物浓度显著下降, 但颗粒物中硝酸盐含量急剧升高, 其成因仍不明朗。夜间化学反应是驱动硝酸盐演变的关键要素, 然而NO₃自由基和硝酸盐作为参与夜间化学反应的主要物种, 其垂直梯度观测研究基本处于空白。本研究利用长光程差分吸收光谱技术在我国首次实现对NO₃、O₃和NO₂浓度梯度的同步观测。研究发现, 近地面大量NO的排放导致NO₃消耗速率显著高于稳定边界层上部, 从而使得NO₃自由基在稳定边界层上部累积, 驱动夜间稳定边界层内硝酸盐的生成(Yan et al., 2021)。然而, 残留层中高浓度臭氧虽然有驱动NO_x向硝酸盐转化的潜能, 但因为残留层中不利气象条件(逆温导致的高温、低湿)以及较低的颗粒物比表面积, 使得残留层内硝酸盐生成率极低(Tang et al., 2021c)。在这种气象条件下, 生成后的硝酸盐也会通过气粒平衡再次进入到气相中, 使得残留层中硝酸盐浓度保持在极低的状态下。本研究证实了夜间稳定边界层上部是硝酸盐生成主要区间。由于残留层中NO_x的汇极弱, 因此推测夜间形成的N₂O₅和硝酸气体可在白天光解形成NO_x, 从而促发臭氧生成, 这一研究结果为解释我国臭氧浓度爆发增长提供线索。



主要参考文献

- Tang et al., Aggravated ozone pollution in the strong free convection boundary layer, STETON, 2021b.
Kang, Tang* et al., Validation and evaluation of MAX-DOAS observed NO₂ vertical profile in Beijing, AAS, 2021.
Tang et al., Low particulate nitrate in the residual layer in autumn over the North China Plain, STETON, 782, 146845, 2021c.
Wu, Tang* et al., Vertical evolution of boundary layer VOCs in summer over the North China Plain and differences between winter and summer, AAS, 2021.
Liu, Tang* et al., Impact of residual layer transport on air pollution in Beijing, China, EP, 271C, 116325, 2021.
Yan, Wang*, Tang*, Zhou* et al., Vertically increased NO₃ radical in the nocturnal boundary layer, STETON., 763, 142969, 2021.
Tang et al., Bypassing the NO_x titration trap in ozone pollution control in Beijing, AR, 249, 150333, 2021a.
Wu, Tang* et al., Vertically decreased VOC concentration and reactivity in the planetary boundary layer in winter over the North China Plain, AR, 240, 104930, 2020.
Liu, Tang* et al., Mixing layer transport flux of particulate matter in Beijing, China, ACP, 19, 9531-9540, 2019.
Zhao, Tang*, Yu* et al., Evolution of boundary layer ozone in Shijiazhuang, a suburban site on the North China Plain, JES, 83, 152-160, 2019.
Zhu, Tang* et al., The spatial representativeness of mixing layer height observations in the North China Plain, AR, 209, 204-211, 2018.
Zhu, Tang* et al., Mixing layer height on the North China Plain and meteorological evidence of serious air pollution in southern Hebei, ACP, 18, 4897-4910, 2018.
Tang et al., Modelling study of boundary-layer ozone over northern China - Part I: Ozone budget in summer. AR, 187, 128-137, 2017.
Tang et al., Modelling study of boundary-layer ozone over northern China - Part II: Responses to emission reductions during Beijing Olympics. AR, 193, 83-93, 2017.
Tang et al., Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China, ACP, 16, 2459-2475, 2016.
Zhu, Tang* et al., Regional pollution and its formation mechanism over North China Plain: A case study with ceilometer observations and model simulations, JGR, 121, 14574-14588, 2016.
Tang et al., Impact of emission controls on air quality in Beijing during APEC 2014: lidar ceilometer observations, ACP, 15, 12667-12680, 2015.



联系方式

邮箱: tgq@dq.cern.ac.cn

电话: 18511431911

地址: 铁塔分部和畅楼207

主页: <http://peopleucas.edu.cn/~0052629>