

DOI: 10.5846/stxb202007221925

莫丽春, 马蕊, 谢屹, 陈建成. 北京湿地削减大气 PM_{2.5} 的生态系统服务流研究. 生态学报, 2021, 41(14): 5570-5577.

Mo L C, Ma R, Xie Y, Chen J C. Ecosystem service flows of wetlands blocking atmospheric PM_{2.5} in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5570-5577.

北京湿地削减大气 PM_{2.5} 的生态系统服务流研究

莫丽春¹, 马蕊², 谢屹¹, 陈建成^{1,*}

¹ 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

² 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

摘要: 湿地对大气颗粒物的沉降和运移有一定的影响。目前, 相关研究多集中在小尺度定量湿地下垫面的颗粒物沉降速度与沉降量以及湿地植物对颗粒物的吸附或阻滞作用。但由于方法的缺失, 研究无法在大尺度上定量解释有关湿地对颗粒物的产生、转移、转化和传递过程, 这也导致研究结果对政策制定和城市空间规划缺少指导作用。因此, 本研究引入了生态系统服务流模型的理论框架, 结合颗粒物干沉降与 HYSPLIT 模型, 量化北京市湿地削减 PM_{2.5} 服务的物理流量、流动路径以及受益地区。研究表明: (1) 北京市湿地 2015 年 PM_{2.5} 沉降总量为 4240 t, 单位面积的平均沉降量为 $8.27 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$; 2018 年为 2610 t, 单位面积的平均沉降量为 $4.46 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$; (2) 2015 年和 2018 年北京市湿地削减 PM_{2.5} 生态系统服务物理流量最高值均出现在冬季, 最低值出现在夏季, 总体呈现出冬季>春季>秋季>夏季的趋势; (3) 2015 年和 2018 年向华北地区迁移的气流轨迹占当季气流轨迹总数的比例最大, 京津冀地区与山东省为主要受益区。研究结果既为科学管理湿地资源和实现区域可持续发展提供客观准确的依据, 也可开展湿地生态系统服务流的相关研究奠定一定的基础。

关键词: 城市湿地, PM_{2.5}, 生态系统服务流, 北京市

Ecosystem service flows of wetlands blocking atmospheric PM_{2.5} in Beijing

MO Lichun¹, MA Rui², XIE Yi¹, CHEN Jiancheng^{1,*}

¹ School of Economics & Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Wetlands can reduce particle concentration in atmosphere by changing air conditions and remove particles by deposition as well as plant collection. Previous study only focused on small scale to reveal the effect of wetlands in air pollution control on the mechanism level. However, there lacks precisely study to quantify the effect on a large scale which makes the research results hardly support decision making for the governments. Therefore, in the current study, based on the theoretical framework of the ecosystem service flow model, we used the particulate dry sedimentation model and the HYSPLIT model to empirically test the physical flows, flow paths, and benefited areas of Beijing's wetland reduction of PM_{2.5} services. The results show that (1) the total amount of PM_{2.5} settlement in Beijing wetlands in 2015 was 4240 t, and the average settlement per unit area was $8.27 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$; while in 2018, it was 2610 t and the average settlement per unit area was $4.46 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$. (2) In 2015 and 2018, the highest value of the physical flow of Beijing's wetland reduction PM_{2.5} ecosystem services appeared in winter, and the lowest value occurred in summer>Spring>Autumn>Summer trend. (3) The airflow trajectories that migrated to north China in 2015 and 2018 accounted for the largest proportion of the total airflow trajectories in the current season, with Beijing-Tianjin-Hebei region and Shandong Province as the main beneficiaries. Finally, it provides an objective and accurate basis for scientific management of wetland resources and the realization of

基金项目: 中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-27)

收稿日期: 2020-07-22; 网络出版日期: 2021-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenjc1963@163.com

regional sustainable development, and also lays a foundation for the related research on ecosystem service flows.

Key Words: urban wetlands; PM_{2.5}; ecosystem services flow; Beijing

城市湿地具有较大的比热容,局部高蒸发量和湿地植物的蒸腾作用能够增加区域空气湿度并改变近地表的空气流动,从而起到降低大气粉尘含量,增加颗粒物干沉降等生态作用^[1-3]。较大面积或分布较为集中的湿地还能够促进大气湍流,减少城市大气颗粒物的积累,从而显著改善城市的大气环境质量^[4]。目前,相关研究多集中在小尺度^[5-8] 量化湿地下垫面的颗粒物沉降速度与沉降量^[7,9-11] 以及湿地植物对颗粒物的吸附^[9,12] 或阻滞^[13] 作用。由于方法的缺失,相关研究无法在大尺度上定量或解释有关湿地对颗粒物的产生、转移、转化和传递过程,这也导致相关研究结果对政策制定或城市空间规划的指导意义不明确。

生态系统服务流是指供给区提供生态系统服务,依靠或不经载体,在自然或人为因素驱动下,沿某一方向和路径传递到受益区的过程^[14],其强调服务供给地区与服务受益地区之间的时空对应关系^[15-16],是一个地理区域中贸易、政策和资源管理决策联系的直接结果。在诸多的学科中,通过生态系统服务流的方法在很大程度上解决了很多问题。例如,土地系统科学使用生态服务流耦合了社会生态系统与土地利用变化间的复杂关系^[17-18];生态经济学应用生态服务流中自然资源的物理流动来论述了区域间可持续性发展^[19-21];环境政策学通过生态服务流分析对国家和国际生物多样性战略的制定起到了决定作用^[22-23]。

华北地区近年来遭受严重的大气污染,引起了社会各界广泛关注。污染物传输路径是大气运动的结果,非人为可控因素,污染一旦产生,其运动轨迹上的所有区域受到严重影响。湿地能够在污染物传输的过程中去除一部分颗粒物,从而降低污染物浓度,污染物传输路径上的下游区域所受的污染也会相应地减轻,因此这些区域成为了受益区域。明确从供给区到受益区的流量、流向等对研究湿地在削减 PM_{2.5} 浓度中的价值有着十分重要的作用。因此本文引入生态服务流方法,主要研究内容包括:(1) 量化削减大气 PM_{2.5} 服务流物理流量;(2) 模拟计算削减大气 PM_{2.5} 服务流动路径;(3) 识别削减大气 PM_{2.5} 服务流受益区。旨在揭示大尺度颗粒物削减规律,为相关政策指定提供可靠理论依据。

1 研究区域概况

根据北京市园林绿化局最新公布的数据显示当前北京市湿地面积为 $5.86 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全市总面积比例为 3.6%。湖泊、水库和河流等开放性水面所占湿地总面积的 90% 以上,水库和湖泊湿地主要位于城市西北部的山区,整体水域面积为 $3.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 约占总水域的 34%—56%, 其中密云水库的面积最大,为 $6.25 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 市内有隶属海河流域的五大水系,分别为北运河、大清河、永定河、蓟运河与潮白河,河流湿地面积为 $2.29 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占湿地总面积的 25.33%^[24]。因此本文主要估算具有开放性水面的湿地对颗粒物的削减作用。

2 研究方法

2.1 数据来源

北京颗粒污染物(PM_{2.5})逐月浓度数据来源于中国地面气候资料月值数据集台站。前向轨迹模拟的资料来源为 NCEP(美国国家环境预报中心)提供的同时段全球资料同化系统(GDAS)再分析资料,该资料每 6h 更新一次,分别为 00:00、06:00、12:00 和 18:00 (UTC,世界时),水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,垂直方向分 18 层,气象要素场包括气温、气压、风速、降水量、相对湿度、日照辐射等(<http://ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/reanalysis>)。

2.2 削减 PM_{2.5} 服务物理流量计算

作为清除大气颗粒物的主要方式,干沉降易受到多种因素影响,如微气象条件(如风速)、下垫面条件、颗粒物浓度分布等。所表述的颗粒物干沉降量计算公式可转化为下式:

$$F = V(r) \cdot C(r) \cdot T(r) \cdot S \quad (1)$$

$V(r)$ 代表 $PM_{2.5}$ 的沉降速率, $C(r)$ 表示 $PM_{2.5}$ 的浓度, $T(r)$ 表示 $PM_{2.5}$ 沉降时间, S 表示北京湿地面积^[25]。根据张彪等人研究, 湿地综合功能重要性与湿地面积成正相关关系, 而在密云、延庆和怀柔等辖区分布着大面积的湿地, 北京市湿地生态系统服务主要来源于这些远郊区。本文基于已有研究 2015 年和 2018 年在北京不同季节对开放水面进行的沉降速度计算结果, 以这两个年份作为案例进行进一步生态服务流分析。计算北京市湿地 $PM_{2.5}$ 削减量时, 以市区、密云、延庆、房山等远郊区 $PM_{2.5}$ 平均浓度为准。

2.3 前向轨迹模式

前向轨迹模式采用美国国家海洋大气研究中心空气资源实验室 (NOAA) 的 HYSPLIT4.9 版本。该模式是欧拉和拉格朗日混合型的扩散模式, 其平流和扩散的处理均采用拉格朗日方法, 浓度计算采用欧拉方法。为研究北京市地区及远距离污染迁移对其他省市 $PM_{2.5}$ 浓度的影响, 利用 HYSPLIT 模拟每日气团移动的 48 h 前向轨迹, 以反映气流迁移特征。由于边界层的平均流场特征在高度 500 m 处能够得到较好反映, 故在模拟轨迹时选取高度为 500 m^[26-27]。

2.4 轨迹聚类分析

按照样本之间的距离定义聚类类别的称为系统聚类法, 它将总共 n 个变量分成不同的 n 类, 先把距离最为接近的两类合并, 此时共有 $n-1$ 类, 再从这 $n-1$ 类中把最接近的两类合并为一类, 与上一步类似, 这时变成 $n-2$ 类, 接下来以此类推, 直至变为一类。因为我们只关注北京的前向气流轨迹迁移的水平方向, 所以采用 Angle Distance 算法对迁移气流进行分类, 以便得到不同的气流类型。

2.5 削减 $PM_{2.5}$ 服务受益区识别

颗粒物迁移路径所经过的区域是受颗粒物影响的地区。具体来说, 当发生颗粒物削减服务时, 路径中所含 $PM_{2.5}$ 浓度将低于未发生该服务时。此外, 从空间上来看, 颗粒物削减服务体现在以下两个方面: (1) 潜在影响区内和实际影响区外的颗粒物消失; (2) 实际影响区内颗粒物量减小, 但不为零。接受颗粒物沉降服务的地区即为受益区。基于以上情况, 可判断颗粒物迁移路径所经过的区域即为颗粒物沉降服务的实际受益地区。

3 结果与分析

3.1 北京湿地削减 $PM_{2.5}$ 生态服务物理流量

本文参考已有研究结果得到 2015 年和 2018 年不同季节水面 $PM_{2.5}$ 的沉降速度^[9], 结果如表 1 所示。为保证计算结果的准确性, 也采取了这两年的浓度监测和气象数据对轨迹和受益区进行了分析

表 1 北京市不同季节湿地 $PM_{2.5}$ 干沉降速率
Table 1 Dry deposition rate of wetland $PM_{2.5}$ in different seasons in Beijing

季节 Season	干沉降速率/(cm/s) Dry deposition rate	季节 Season	干沉降速率/(cm/s) Dry deposition rate
春 Spring	0.2±0.03	秋 Autumn	0.2±0.03
夏 Summer	0.1±0.02	冬 Winter	0.7±0.01

3.1.1 季节变化

图 1 显示了 2015 年与 2018 年 1 月—12 月 $PM_{2.5}$ 干沉降量的逐月变化结果, 可以看出, 2015 年 12 月 $PM_{2.5}$ 的干沉降量达到最高, 为 1140 t; 5 月干沉降量最低, 为 75 t。2018 年大气颗粒物干沉降量峰值在 11 月, 为 690 t; 最低值出现在 6 月, 为 70 t。总体上, 春季和冬季干沉降量较高, 夏季和秋季沉降量保持在较低的水平, 整体上冬季>春季>秋季>夏季。北方城市冬季 (10 月—12 月) 天气寒冷, 大量煤炭燃烧用于供暖, 一旦其浓度超过了大气循环承载能力, 城市扬尘等大气污染物将持续积聚。除了排放源强度的改变, 雾霾天气增多也与北京市气候密切相关, 相比于夏秋季节的雨水充沛, 冬季相对干燥, 降雪强度小, 对污染物的清除效果较弱。

此外,受到静稳天气的影响,污染物不易扩散,由此导致冬季的干沉降量最大,明显高于夏季。

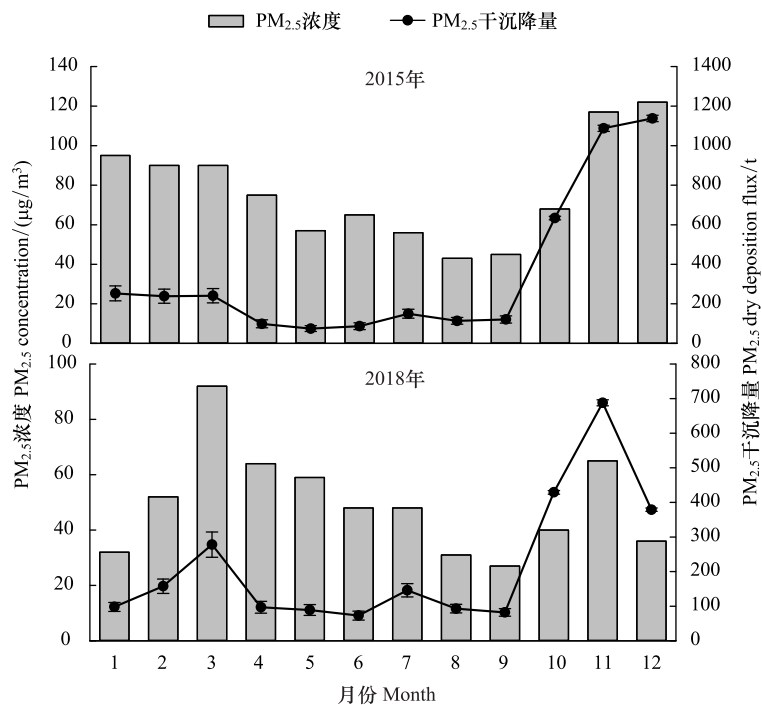


图1 大气颗粒物 PM_{2.5}干沉降量及浓度逐月变化

Fig.1 Dry deposition flux and concentration of PM_{2.5}

3.1.2 年度变化

北京市湿地 2015 年 PM_{2.5} 沉降总量为 $4.24 \times 10^3 \text{ t}$, 单位面积的平均沉降量为 $8.27 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$; 2018 年为 $2.61 \times 10^3 \text{ t}$, 单位面积的平均沉降量为 $4.46 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ 。与 2015 年相比, 2018 年沉降量下降了 38.4%。尽管北京市湿地的削减 PM_{2.5} 服务物理流量在 2018 年大幅下降, 但颗粒物干沉降量基本与 PM_{2.5} 浓度变化特征呈正相关关系, 2015 年 PM_{2.5} 平均浓度为 $77 \mu\text{g/m}^3$, 2018 年 PM_{2.5} 平均浓度为 $49 \mu\text{g/m}^3$, 同比下降 36.4%, 因此 2018 年北京市湿地生态系统的削减 PM_{2.5} 效益与 2015 年相似。

在北京奥林匹克森林公园的对比研究显示, 林地细颗粒物的沉降速度约为 $0.1\text{--}1.7 \text{ cm/s}$, 而在湿地的沉降速度约为 $0.1\text{--}0.7 \text{ cm/s}$ ^[9-10], 但在湿地上空颗粒物浓度也显著低于林地和裸地^[5], 在北京郊区森林和湿地的独立研究所得结果与之相似^[6-8]。因此, 湿地通过干沉降去除颗粒物的能力相比林地较弱, 但由于改变了近地表大气条件, 湿地的存在可以降低大气中颗粒物浓度。

3.2 北京湿地削减 PM_{2.5} 生态服务流轨迹模拟

利用 HYSPLIT 模型, 以北京市 (39.90°N , 116.41°E) 为中心坐标进行模拟, 确定污染气团的前向轨迹, 从而明确北京市大气颗粒物 PM_{2.5} 跨区域消散过程中的气流轨迹。由于不同季节, 前向轨迹气流的流动方向不同, 且冬季为 PM_{2.5} 的平均浓度最高, 随气流流动, 造成的影响更大, 所以利用轨迹聚类方法, 将 2015 年和 2018 年 10 月—12 月气流轨迹分别聚类, 再根据每类气流轨迹所代表的典型空间类型, 分别分为 5 类和 8 类, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 聚类模拟的所有气流轨迹具有较好的一致性, 以北京市为气流轨迹扩散中心, 分别有向东北、华东、华北三个地区迁移的气团流动路径。2015 年, 迁移至华北地区的气流轨迹占当季气流轨迹总数的比例最大, 几乎全部气流轨迹均经过河北、天津等地。向华东地区主要为山东方向的扩散的气流轨迹占 39%; 迁移至东北地区包括辽宁、吉林、黑龙江南部方向的气流轨迹占 18%。2018 年, 向华北地区迁移的气流

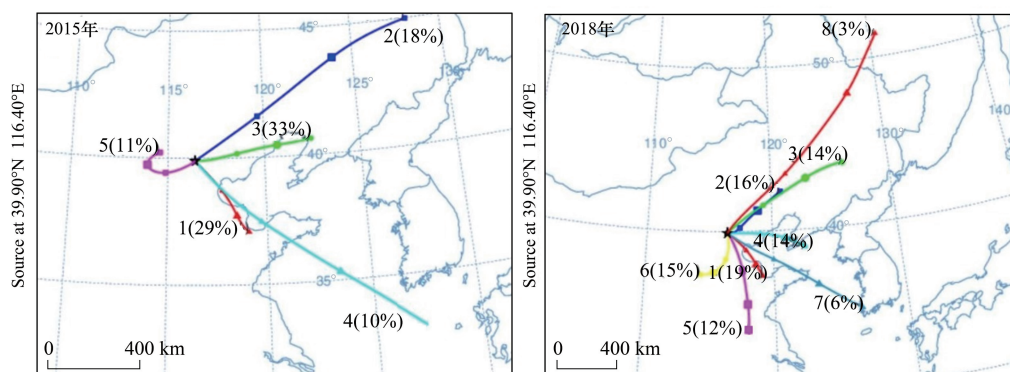


图2 2015年和2018年前向轨迹聚类分布分析结果

Fig.2 Forward trajectory cluster distribution in 2015 and 2018

轨迹占当季气流轨迹总数的比例仍最大;迁移至华东地区包括山东、江苏方向的气流轨迹占22%;迁移至东北地区包括辽宁、吉林、黑龙江方向的气流轨迹占33%。在这两年中,东北气团流经区域最广,且气团传输路径稳定,没有明显的轨迹偏移。而向华东和华北地区迁移的大部分轨迹相对水平跨度较小,风速较低,水平运动速度慢,这为污染物短距离扩散提供了便利条件。

3.3 北京湿地削减 $PM_{2.5}$ 生态服务受益区识别

与2015年相比,2018年气流轨迹所经过范围相对较广,受益面积相对较大。但总体来看,2015年和2018年的气流轨迹趋势基本相同,主要受北部寒冷和高压影响,北京市的 $PM_{2.5}$ 通过风传播到南部,进而影响南部地区的大气污染物组成。此外,顺风方向的城市(如天津,廊坊,衡水和沧州)地形以平原为主,而平原的空气扩散相对较弱,因此极易受到临近区域空气污染的扩散的影响而导致局部 $PM_{2.5}$ 浓度显著提高。此外,已有研究^[28]还表明北京市在偏北风作用下, $PM_{2.5}$ 质量浓度值最低,因此可以推断颗粒物随气流轨迹向南迁移,而在西南风、南风作用下, $PM_{2.5}$ 浓度值较高,并且由于北部地区山区的阻挡作用,限制了部分污染物的迁移,此外偏南风的风速较小,使得颗粒物在北京地区累积,因此在迁移至东北方向的气流轨迹中 $PM_{2.5}$ 浓度较低,东三省相较于华北地区受北京市 $PM_{2.5}$ 浓度的影响也相应较小。北京市湿地削减大气中 $PM_{2.5}$ 服务发生的区域,即为北京市湿地削减 $PM_{2.5}$ 服务的顺风受益地区,因此京津冀地区与山东省为主要受益区。

4 讨论

4.1 北京湿地削减大气 $PM_{2.5}$ 生态系统服务物理流

削减 $PM_{2.5}$ 生态系统服务的变化是自然和人为因素的共同作用的结果。干沉降是最重要的 $PM_{2.5}$ 去除过程,对微气象条件敏感,在2015年—2018年期间,北京市湿地面积持续增加,湿地提供一个具有较低温度、较高相对湿度的小气候与周围临近区域形成差异,促进大气湍流作用,进而加强对细颗粒物的沉降作用。政府持续加大湿地保护力度,大力推进湿地保护与建设,使湿地生态质量逐步提升。上述自然和人为因素都可以增强湿地削减大气 $PM_{2.5}$ 的生态服务功能。

但是,干沉降物理流量也和大气中 $PM_{2.5}$ 浓度密切相关。近年来,北京市以精细治理为手段,联合治理为基础,依法治理为保障,优化调整运输结构,产业结构,能源结构和土地结构,积极推进细颗粒物($PM_{2.5}$)的管理,着力加强地区的联防联控,全面促进城市的精细管理,推动绿色发展,使得北京空气达标天数已由2015年186天上升到2018年227天, $PM_{2.5}$ 浓度显著降低。因此虽然北京市湿地生态功能不断优化,但2018年实际沉降物理流量并未随之增加。而在一年之内,北京市的 $PM_{2.5}$ 变化的特征是春季开始时浓度较高,主要原因是北方春季温暖干燥,大风天数较多且风速较大,超过了沙尘等风速阈值,使得空气扬尘增多。而由于北京是温带季风气候,夏季处于汛期,高温多雨,降水能对云下污染物进行高强度冲刷,从而使 $PM_{2.5}$ 质量浓度维持在较

低水平。而从深秋到初冬突然升高,从 11 月到 3 月,PM_{2.5}浓度一直比较高。与之相对应的是,干沉降量在冬春季相对较高,这也与国内研究结果基本一致^[29]。

4.2 北京湿地削减大气 PM_{2.5}生态系统服务流路径模拟

作为生态学研究的热门话题,生态系统服务与人类福祉有着重要的关系。分析生态系统服务流的载体可以揭示不同类型的生态服务^[30]。风场引起的 PM_{2.5}区域传播是影响 PM_{2.5}浓度空间分布格局的关键原因^[31]。因此在这项研究中,选择了空气作为载体,伴随空气分子的布朗运动,生态服务也在做不定向流动。量化和绘制生态系统服务流在确定供需热点和生态系统服务的传递路径方面起着重要作用,这有助于人类保护有利服务,及时处理预防有害因素^[32-34]。本文的模拟轨迹是对一个影响范围的可视化展示,当湿地出现在该轨迹上时,会在一定程度上降低其颗粒物浓度,从而使得轨迹上其他区域受益。已有研究结果显示,华北地区由于受到冷暖气团锋面系统、地形和背风环流的综合影响,污染物运动有一定的特殊性。太行山脉和燕山山脉的阻挡使得北京西部和北部海拔较高,形成南北背风区优势通道,污染物会从河北一带北上至北京,聚集后再向河北、山东、天津等区域扩散^[32],该分析结果与本文气团轨迹分析结果相符合。

本文结合已有的湿地量化结果和两个不同年份的气象数据,估算了全北京湿地年尺度上削减的 PM_{2.5}颗粒物的量,并在此基础上引入 HYSPLIT 模拟,分析了北京湿地对削减 PM_{2.5}生态服务的轨迹。为保证计算的准确性,给出了每一条模拟轨迹的概率。目前所测算的北京湿地年去除颗粒物的数量级为 10³t,而北京仅仅秸秆燃烧一项一年的 PM_{2.5}排放的数量级就达到了 10⁴t^[35],而相关研究指出 PM_{2.5}中有机碳仅占总量的13.3%左右^[33],因此估算北京湿地一年去除的量仅占不到排放量的 1%;其削减作用有限。此外,PM_{2.5}的组成成分中含有重金属颗粒等对生态系统有害的颗粒物,但目前的观测并没有发现其对生态系统造成影响,可能是由于沉降量并没有超过生态系统的自净能力。

结合大范围的气象数据可知,北京市的污染物扩散范围较大,包括京津冀、华北和东北部分区域,因此北京湿地的削减作用仍然可以为较远的区域提供生态服务流。

4.3 管理建议

城市的外观和环境状况直接展示了城市的整体形象,是衡量城市管理水平的一个重要指标。北京市气候干燥,降水少,容易形成大风和沙尘天气,而城市湿地可以创造低风速,低温,高湿度的空气环境,影响气流的速度和方向,从而改变大气中颗粒物的运动使 PM_{2.5}难以散布,这可能会将颗粒物滞留在城市湿地茂密的林带或水体中。因此城市湿地可以降低局部地区的 PM_{2.5}浓度,同时防止 PM_{2.5}扩散到其他地区,从而也降低周围地区的 PM_{2.5}浓度^[36]。此外,湿地面积越大,湿地生态系统服务价值越高,因此北京湿地生态系统服务功能的主要提供者是郊区湖泊、水库和河流湿地。所以,应该执行严格的政策,保证湿地水质,优化湿地生态系统结构,增强生物多样性。此外,为弥补郊区所做的牺牲,政府也要做出相应补偿,从而调动人们自发自愿保护环境的积极性。虽然在北京湿地类型中坑塘、稻田和公园中湿地所占的面积很小,但由于其处在重要的关键节点上,其同样也具有较高的生态服务功能。应该注意到,城市常住人口的密度是偏远郊区的数百倍,对汽车,住房和家用电器的需求也相应较高,日常生活、交通等排出的废气也随之增加^[37]。同时,较高的居住密度也可能影响城市风速,减弱污染物的扩散从而增加了 PM_{2.5}的浓度。尤其在冬季,大面积取暖易导致雾霾天气频发,因此城区单位面积湿地生态系统服务价值相应较高,削减 PM_{2.5}服务的直接受益人群数量较大,顺风区沿线如河北省,天津市和山东省等也会因此受益。城市的存在和发展有赖于其与湿地生态系统的协调关系,人们在利用这些重要的人工湿地带来经济利益的同时,也要保证不超过其环境承载力,以保证生态系统的健康发展。

5 结论

(1)北京市湿地 2015 年 PM_{2.5}沉降总量为 4.24×10³t,单位面积的平均沉降量为 8.27×10⁻³kg/m²;2018 年为 2.61×10³t,单位面积的平均沉降量为 4.46×10⁻³kg/m²。与 2015 年相比,2018 年北京市湿地削减 PM_{2.5}生态系统服务物理流量呈现下降趋势。

(2)2015 年和 2018 年北京市湿地削减 $PM_{2.5}$ 生态系统服务物理流量最高值均出现在冬季,最低值均出现在夏季,整体上表现出冬季>春季>秋季>夏季的走势。

(3)2015 年和 2018 年气流轨迹大致向三个地区迁移,分别为华北地区,主要包括河北、天津;华东地区,主要包括山东;东北地区,主要包括辽宁、吉林和黑龙江。其中,向华北地区迁移的气流轨迹占当季气流轨迹总数的比例最大,京津冀地区与山东省为主要受益区。

参考文献 (References):

- [1] 崔丽娟, 康晓明, 赵欣胜, 李伟, 马牧源, 张曼胤, 魏圆云. 北京典型城市湿地小气候效应时空变化特征. 生态学杂志, 2015, 34(1): 212-218.
- [2] Kang X M, Wang Y F, Chen H, Tian J Q, Xiao X Y, Rui Y C, Zhong L, Kardol P, Hao Y B, Xiao X M. Modeling carbon fluxes using multi-temporal MODIS imagery and CO_2 eddy flux tower data in Zoige Alpine Wetland, South-West China. Wetlands, 2014, 34(3): 603-618.
- [3] Huntingford C, Lowe J A, Booth B B B, Jones C D, Harris G R, Gohar L K, Meir P. Contributions of carbon cycle uncertainty to future climate projection spread. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2009, 61(2): 355-360.
- [4] 康晓明, 崔丽娟, 赵欣胜, 李伟, 张曼胤, 魏圆云, 雷茵茹, 马牧源. 北京市湿地削减大气细颗粒物 $PM_{2.5}$ 功能. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2807-2813.
- [5] Liu J K, Mo L C, Zhu L J, Yang Y L, Liu J T, Qiu D D, Zhang Z M, Liu J L. Removal efficiency of particulate matters at different underlying surfaces in Beijing. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(1): 408-417.
- [6] Zhu L J, Liu J K, Cong L, Ma W M, Ma W, Zhang Z M. Spatiotemporal characteristics of particulate matter and dry deposition flux in the Cuihu Wetland of Beijing. PLoS One, 2016, 11(7): e0158616.
- [7] Qiu D D, Liu J K, Zhu L J, Mo L C, Zhang Z M. Particulate matter assessment of a wetland in Beijing. Journal of Environmental Sciences, 2015, 36: 93-101.
- [8] Liu J K, Zhai J X, Zhu L J, Yang Y L, Liu J T, Zhang Z M. Particle removal by vegetation: comparison in a forest and a wetland. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(2): 1597-1607.
- [9] Zhang Z M, Liu J K, Wu Y N, Yan G X, Zhu L J, Yu X X. Multi-scale comparison of the fine particle removal capacity of urban forests and wetlands. Scientific Reports, 2017, 7: 46214.
- [10] Liu J K, Zhu L J, Wang H H, Yang Y L, Liu J T, Qiu D D, Ma W, Zhang Z M, Liu J L. Dry deposition of particulate matter at an urban forest, wetland and lake surface in Beijing. Atmospheric Environment, 2016, 125: 178-187.
- [11] Liu J K, Zhang Z M, Zhang M X. Impacts of forest structure on precipitation interception and run-off generation in a semiarid region in northern China. Hydrological Processes, 2018, 32(15): 2362-2376.
- [12] Yan G X, Liu J K, Zhu L J, Zhai J X, Cong L, Ma W M, Wang Y, Wu Y N, Zhang Z M. Effectiveness of wetland plants as biofilters for inhalable particles in an urban park. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 435-443.
- [13] 丛岭, 翟杰休, 马文梅, 刘佳凯, 王宇, 武亚楠, 张振明. 林地和湿地大气颗粒物阻滞效果研究. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1017-1025.
- [14] 李双成. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014.
- [15] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. 生态学报, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [16] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. 生态学报, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [17] Bruckner M, Fischer G, Tramberend S, Giljum S. Measuring telecouplings in the global land system: A review and comparative evaluation of land footprint accounting methods. Ecological Economics, 2015, 114: 11-21.
- [18] Lambin E F, Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(9): 3465-3472.
- [19] Kissinger M, Rees W E, Timmer V. Interregional sustainability: governance and policy in an ecologically interdependent world. Environmental Science & Policy, 2011, 14(8): 965-976.
- [20] Kissinger M, Rees W E. An interregional ecological approach for modelling sustainability in a globalizing world—Reviewing existing approaches and emerging directions. Ecological Modelling, 2010, 221(21): 2615-2623.
- [21] Weinzettel J, Steen-Olsen K, Hertwich E G, Borucke M, Galli A. Ecological footprint of nations: comparison of process analysis, and standard and hybrid multiregional input-output analysis. Ecological Economics, 2014, 101: 115-126.
- [22] Pascual U, Palomo I, Adams W M, Chan K M A, Daw T M, Garmendia E, Gómez-Baggethun E, De Groot R S, Mace G M, Martín-López B,

- Phelps J. Off-stage ecosystem service burdens: a blind spot for global sustainability. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(7): 075001.
- [23] Schröter M, Albert C, Marques A, Tobon W, Lavorel S, Maes J, Brown C, Klotz S, Bonn A. National ecosystem assessments in Europe: a review. *BioScience*, 2016, 66(10): 813-828.
- [24] 张彪, 史芸婷, 李庆旭, 谢高地. 北京湿地生态系统重要服务功能及其价值评估. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1311-1324.
- [25] 宫兆宁, 张翼然, 宫辉力, 赵文吉. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析. *地理学报*, 2011, 66(1): 77-88.
- [26] 赵恒, 王体健, 江飞, 谢旻. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源. *热带气象学报*, 2009, 25(2): 181-186.
- [27] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源. *环境科学研究*, 2013, 26(4): 357-363.
- [28] 蒲维维, 赵秀娟, 张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 PM_{2.5} 污染的影响. *应用气象学报*, 2011, 22(6): 716-723.
- [29] Sirois A, Bottenheim J W. Use of backward trajectories to interpret the 5-year record of PAN and O₃ ambient air concentrations at Kejimikujik National Park, Nova Scotia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D2): 2867-2881.
- [30] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2161-2171.
- [31] Yan D, Lei Y L, Shi Y K, Zhu Q, Li L, Zhang Z E. Evolution of the spatiotemporal pattern of PM_{2.5} concentrations in China-A case study from the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Atmospheric Environment*, 2018, 183: 225-233.
- [32] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [33] 张婷婷. 北京典型地区大气 PM_{2.5} 的理化特征及来源初步解析. 北京: 北京建筑大学, 2018.
- [34] 陈云, 董军燕. 华北地区重质大气污染物迁移原理浅析//2017 中国环境科学学会科学与技术年论文集(第一卷). 厦门: 中国环境科学学会, 2017: 7-7.
- [35] 王明珠, 刘诗奇, 石蜜蜜. 北京 PM_{2.5} 排放量估算及预测——以秸秆燃烧为例. *电子制作*, 2013, (9): 245-245, 230-230.
- [36] Chaikumbung M, Doucouliagos H, Scarborough H. The economic value of wetlands in developing countries: a meta-regression analysis. *Ecological Economics*, 2016, 124: 164-174.
- [37] Shen H Z, Tao S, Chen Y L, Ciais P, Güneralp B, Ru M Y, Zhong Q R, Yun X, Zhu X, Huang T B, Tao W, Chen Y C, Li B G, Wang X L, Liu W X, Liu J F, Zhao S Q. Urbanization-induced population migration has reduced ambient PM_{2.5} concentrations in China. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700300.