

· 研究报告 ·

太湖氮磷大气干湿沉降时空特征

刘涛 杨柳燕* 胡志新 孙一宁

(南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室 江苏 南京 210046)

摘要: 为了探索太湖氮磷营养盐干湿沉降特征及对太湖营养盐输入的贡献,于2011年不同季节采集太湖不同位点的大气干湿沉降样品,分析干湿沉降中氮(N)和磷(P)的形态和沉降量。研究表明,输入太湖的磷以干沉降为主,而氮以湿沉降为主。在太湖干沉降中总无机氮(TIN)占总氮(TN)的77.1%,溶解性磷(DIP)占总磷(TP)的77.9%。干沉降中TIN主要以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主。西太湖是TN与TP通过大气干湿沉降输入太湖的最高湖区。太湖全年大气TN沉降总量为20 978 t,TP沉降总量为1 268 t,因此,氮磷大气干湿沉降是太湖营养盐输入的重要来源之一。

关键词: 大气干湿沉降;富营养化;氮;磷;太湖

中图分类号: X169 文献标识码: B 文章编号: 1006-2009(2012)06-0020-05

Spatial-temporal Features of Atmospheric Deposition of Nitrogen and Phosphorus to the Lake Taihu

LIU Tao, YANG Liu-yan*, HU Zhi-xin, SUN Yi-ning

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract: To probe atmospheric deposition characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients in the Lake Taihu and their contributions to the lake, these were analyzed that various forms and fluxes of nitrogen and phosphorus of samples collected from different sites of Lake Taihu at different seasons in 2011. The results showed that phosphorus was mainly from dry deposition, whereas atmospheric rainfall was a major source of nitrogen into the Lake Taihu. The total inorganic nitrogen (TIN) accounted for 77.1% of total nitrogen (TN) in dry deposition, while dissolved total phosphorus (DTP) accounted for 77.9% of total phosphorus (TP). $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was a major source of TIN in dry deposition. The input of TN and TP from atmospheric deposition in the West Lake Taihu was the highest. The estimated annual atmospheric deposition fluxes of TN and TP in Lake Taihu during 2011 were 20 978 tons and 1 268 tons, respectively. Therefore, the atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus was one of important nutrients sources to Lake Taihu.

Key words: Atmosphere dry and wet deposition; Eutrophication; Nitrogen; Phosphorus; Lake Taihu

湖泊富营养化是当今世界面临的重大水环境问题之一^[1-2]。由于人类活动的不断加剧,导致了大量营养盐在湖泊中累积,影响湖泊水生态系统结构和功能。氮(N)和磷(P)是造成水体富营养化的重要因素。随着工业的快速发展,污染加剧,与其他N、P污染途径相比,大气中N、P干湿沉降常常被人们忽视。

太湖是我国3大淡水湖泊之一,面积2 338 km²,流域面积36 500 km²,地跨江苏、浙江、

安徽、上海三省一市。近几十年来,太湖水体富营养化问题一直受到政府有关部门和学术界的广泛关注^[3-5]。在湖泊营养盐输入途径方面,目前的研

收稿日期:2012-05-06;修订日期:2012-07-18

基金项目:我国湖泊营养物基准和富营养化控制标准研究基金资助项目(2009ZX07106-001-002)

作者简介:刘涛(1986—),男,山东威海人,硕士研究生,主要研究方向为湖泊生态学。

* 通讯作者:杨柳燕 E-mail: yangly@nju.edu.cn

究主要侧重于入湖河道和农业面源污染的输入等,而常常忽略了大气沉降输入。已有的研究表明,大气N、P沉降负荷较高,分别占由环太湖河道输入N、P总负荷的48.8%和46.2%^[6]。大气中大量N、P沉降严重影响浮游植物生长和种群结构^[7-9]。宋玉芝等^[10]于2002年—2003年对太湖湿沉降研究表明,总无机氮(TIN)的湿沉降具有季节性,夏季较高,对太湖水体的富营养化和蓝藻暴发具有潜在的促进作用。翟水晶等^[11]在2007年对太湖北部梅梁湾监测结果显示大气总氮(TN)的年沉降量高达6 958 t,远超过太湖湖泊生态系统理论允许的TN年沉降量。余辉等^[12]研究表明,2008年—2009年太湖总氮(TN)和总磷(TP)的年湿沉降总量分别为10 868 t和247 t,为同期河流入湖负荷的18.6%和11.9%。因此,大气沉降对太湖富营养化和水生态系统结构的影响不容忽视。

为研究大气沉降中N、P营养盐的特征,于2011年1月、4月、7月和11月对太湖进行干沉降监测,并于2011年3月和6月对太湖进行湿沉降监测,估算大气干湿沉降输送到太湖的N、P数量及形态特征,揭示大气N、P干湿沉降对太湖富营养化的影响,以期对太湖富营养化治理与控制提供依据。

1 材料与与方法

1.1 研究区域

在太湖设置3个采样点,为防止城市降尘产生误差,3个采样点均位于太湖水域边。西山(31°3'3.34" N, 120°17'58.60" E)周边为少量农田,大片的山林,人口密度较低,人类活动影响较小;杨湾(31°31'5.18" N, 120°9'59.65" E)位于十八湾景区内,景区紧邻环湖公路,车流量较大,与其他2个位点相比扬尘较大,周边为建筑用地;西太湖(31°24'34.75" N, 119°59'48.23" E)周边为大片农田,人口密度较大,农业活动影响比其他点位严重。干沉降采样时间为1月、4月、7月与11月,湿沉降采样时间为3月与6月。太湖1月与11月盛行西北风,3月、4月与6月盛行东南风,7月盛行东风;3月份降雨量较小,6月份降雨量较大。采样点的设置与杨龙元、翟水晶、余辉等^[6,11-12]研究相比更靠近太湖,避免了采样点设置离湖区较远,因城市降尘造成的对大气沉降的不利影响。3个采样点的具体位置见图1。

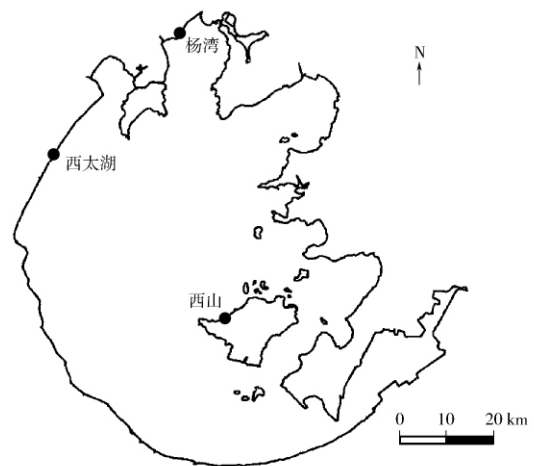


图1 太湖采样位点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Lake Taihu

1.2 研究方法

将直径150 mm,高为300 mm聚乙烯塑料桶置于离地1.5 m高空旷处。塑料桶中加入200 mL~300 mL去离子水用于收集干沉降样品,雨样采集在降水开始5 min~10 min后,用洗净的塑料桶收集样品^[13]。为防止鸟类、风沙扬尘等自然因素对样品营养盐含量的影响,沉降样品采集时间设为1 d。样品收集完后立即冷冻保存带回实验室检测。每个采样点采集大气干湿沉降3个样品,结果用平均值表示。TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;TP采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定。水样经Whatman GF/C玻璃纤维滤膜过滤后测定TIN($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$)和溶解性总磷(DTP),用锌-镉还原法和分光光度法测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,用纳氏试剂比色法测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,用磺胺和盐酸萘乙二胺法测定 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,用过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法测定DTP^[14]。

1.3 计算方法

N、P营养盐干沉降率计算方法:

$$F_d = k_d \times C \times V$$

式中: F_d 为干沉降率,kg/($\text{km}^2 \cdot \text{d}$); k_d 为换算系数,为177.8 kg/($\text{mg} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{d}$); C 为样品营养盐质量浓度,mg/L; V 为收集样品体积,L。

湿沉降率计算方法:

降水中N、P的降水量加权平均质量浓度计算公式如下:

$$C = \sum C_i \times H_i / \sum H_i$$

式中: C_i 为第 i 次降水中某种营养盐的质量浓度, mg/L ; H_i 为第 i 次降水的降水量, mm 。

N、P 营养盐年沉降率可用 C 与年总降水量的乘积求得, 计算公式如下:

$$F_w = k_w \times C \times R$$

式中: F_w 为湿沉降率, $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$; k_w 为换算系数 $k_w = 1 \text{ L} \cdot \text{kg}/(\text{mg} \cdot \text{mm} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{a})$, R 为全年降水量, mm 。

N、P 大气沉降量计算方法为:

$$Q = Q_d + Q_w = \sum F_{di} \times S_i \times d_i / S + \sum F_{wi} \times S_i / S$$

式中: Q 为沉降量, kg ; Q_d 、 Q_w 为干、湿沉降量, t ; F_{di} 、 F_{wi} 为不同采样点干、湿沉降率; S_i 为不同采样点区域, km^2 ; d_i 为不同采样点一年干沉降天数, d ; S 为太湖面积 $2\,338 \text{ km}^2$ 。

根据调查, 2011 年西山降水天数为 106 d, 年降水量为 1 100 mm; 杨湾降水天数为 126 d, 年降水量为 1 048 mm; 西太湖有降水天数为 137 d, 年降水量为 1 177 mm。

2 结果与讨论

2.1 2011 年太湖氮磷干沉降

3 个采样点(西山、杨湾与西太湖)在 1 月份 TN 干沉降率较低, 分别为 $8.27 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 、 $8.10 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 和 $9.63 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$, 而 7 月与 11 月沉降率相对较高; 西山与西太湖 TP 的干沉降率在 4 月份较高, 可能与 4 月份农田耕种有关, 作物的花粉在风力作用下也增加了大气中 P 含量; 杨湾则在 7 月份 TP 的干沉降率较高, 7 月份正是杨湾水体富营养化处于最严重的时期, 大气干沉降中高含量的 P 无疑会加重杨湾水体富营养化的程度。西太湖周边为大量农田, 定期喷洒的化肥、农药污染与作物的花粉等提高了大气中 N、P 营养盐的沉降率, 因此, 西太湖全年的干沉降率较高, N 和 P 干沉降率分别为 $15.65 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 和 $2.17 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 。杨湾全年干沉降率次之, 杨湾周围主要为树木, 紧邻环湖公路, 车流量较大, 建筑较多, 人类活动影响相对较大, N、P 干沉降率分别为 $13.31 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 和 $1.54 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 。西山位于西山岛边, 周围地区由橘树、桃树、杨梅及多种野生乔灌木植被覆盖, 果园等林区对大气环境的影响较小, N、P 干沉降率最低, 分别为 $12.86 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 和 $1.30 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 。太湖不同月份各形态 N、P 的干沉降率见图 2 (a) (b)

(c) (d) (e) (f)。

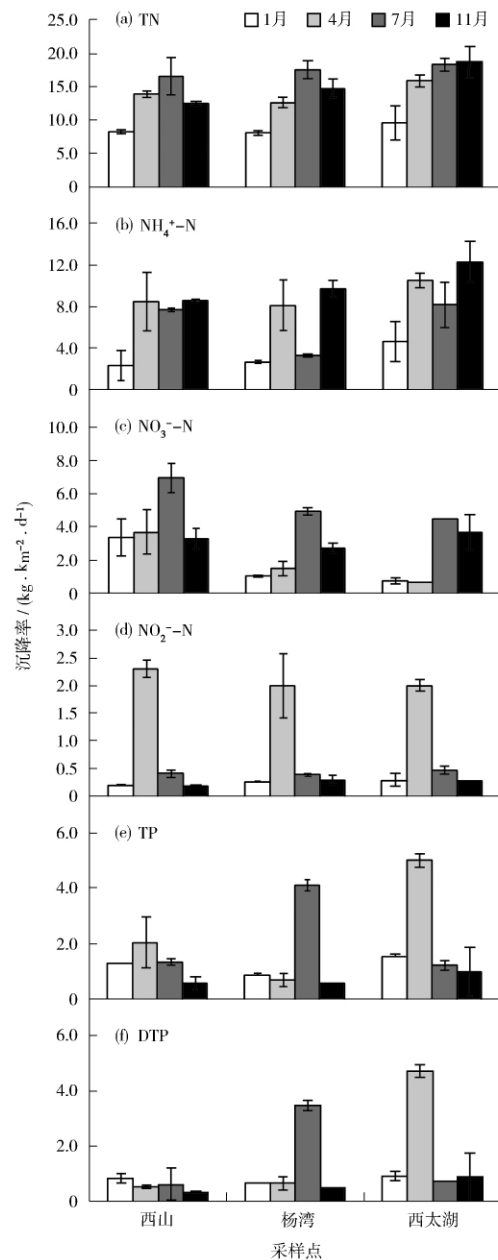


图 2 太湖 2011 年各形态氮磷大气干沉降率
Fig. 2 The dry deposition rates of all forms of nitrogen and phosphorus in Lake Taihu during 2011

在大气干沉降各形态氮素中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 所占比例较高, 西山、杨湾与西太湖全年 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 干沉降率分别为 $6.78 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 、 $5.97 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 和 $8.93 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 。农业活动是大气中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要来源之一, 如土壤和家畜粪便中 NH_3 的挥发等。且温度升高能增加农田土壤液相中的

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的比例,同时 NH_3 和 NH_4^+ 扩散速率也随之增加。在蓝藻暴发较为严重的夏秋季,杨湾与西太湖大气 DTP 沉降率较高。由于太湖流域电力等能源供应的增长,汽车、船舶等水陆运输的扩张,化肥农药等污染加重,大气污染造成的 N、P 营养盐沉降负荷对太湖富营养化的影响越来越大^[4,6]。

2.2 2011 年太湖 TN 和 TP 湿沉降

2011 年 3 月与 6 月太湖降水中 TN 与 TP 质量浓度见图 3(a)(b)。

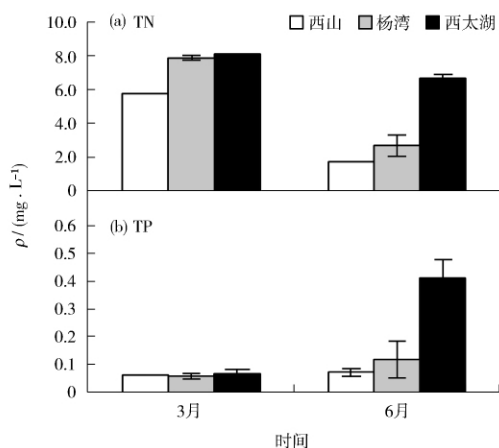


图 3 2011 年太湖降水中 TN 和 TP 质量浓度

Fig. 3 The concentration of total nitrogen and total phosphorus in rainfall of Lake Taihu during 2011

西山、杨湾与西太湖在 3 月份降水中 TN 质量浓度较高,分别为 5.78 mg/L、7.87 mg/L 和 8.10 mg/L; 6 月份 TN 质量浓度相对较低,分别为 1.70 mg/L、2.65 mg/L 与 6.68 mg/L。一般冬、春季降水频率低且降水量小,气溶胶等粒子在空气中存留的时间相对较长,因而在降水中容易出现较高的 N 质量浓度。夏季由于降水量大且降水频率高,气溶胶粒子在大气中停留时间短,氮素在一次

降水之前得不到足够的来源补充,所以降水中 TN 偏低^[12]。而太湖降雨中 TP 质量浓度在 3 月份较低,在西山、杨湾与西太湖分别为 0.07 mg/L、0.06 mg/L 和 0.07 mg/L; 6 月份 TP 质量浓度相对较高,分别为 0.07 mg/L、0.12 mg/L 和 0.41 mg/L。总体上,西山降水中 TN 与 TP 质量浓度较低,而西太湖 TN 与 TP 质量浓度则比较高。

从降水量可见,西山降水量较大,而西太湖降水量较小,从而造成了西太湖 TN 与 TP 质量浓度值较高,降水量见图 4。

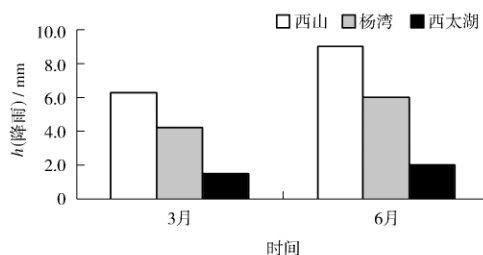


图 4 2011 年太湖不同采样位点 3 月和 6 月降水量

Fig. 4 The monthly total precipitation in different sampling sites of Lake Taihu in March and June during 2011

2.3 太湖 2011 年氮磷大气沉降入湖量估算

太湖周边土地利用类型各异,根据张落成等^[15]对太湖周边土地利用率的研究,太湖流域土地利用可以分为耕地、建设用地、其他用地等几种类型。西山主要为林地和园林用地,杨湾主要为建筑用地,西太湖主要为耕地,3 个采样点代表了不同的土地利用类型。按照太湖周边土地的利用类型将太湖 2 338 km² 水域划分为 3 个不同比例的湖区,2011 年太湖大气 N、P 沉降量由这 3 个不同湖区的沉降量加权估算得到。2011 年太湖 N、P 沉降入湖量见表 1。

表 1 太湖 2011 年 N、P 干湿沉降量

Table 1 The atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in Lake Taihu during 2011

地点	干沉降量						湿沉降量	
	TN	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	TP	DTP	TN	TP
西山	1 684	565	888	101	171	77	1 880	37
杨湾	3 234	614	1 451	178	375	324	3 937	111
西太湖	2 910	442	1 661	140	404	339	7 333	170
总量	7 828	1 621	4 000	419	950	740	13 150	318

由表1可见,太湖全年N沉降量为20 978 t,P的沉降量为1 268 t。其中经湖面降雨、雾等湿沉降途径带入的TN和TP分别为13 150 t和318 t,分别占TN、TP总沉降量的62.7%和25.1%,因此,太湖大气中N以湿沉降为主,而P以干沉降为主。在干沉降中,TIN和DTP占TN与TP的比率较高,分别为77.2%和77.9%。富营养化较为严重的杨湾与西太湖干沉降中DTP占TP的比例明显比西山高,由于沉降到太湖水体中TIN和DTP能够直接被藻类利用,因此,在夏季,N、P大气沉降输入的控制显得尤为重要。湿沉降中TN与TP在西太湖沉降量比杨湾与西山高,可能对西太湖水体富营养化的发生、发展具有潜在的促进作用。

杨龙元等^[6]2002年—2003年在太湖周边设置8个采样点,其中5个采样点设立在周边城市中,每个采样点大气降尘与雨水每月采集一次,均由当地环保监测部门监测分析。余辉等^[12]在太湖周边设置8个采样点,取每次降水的混合水样,如连续几天降水,24 h采集一个样品。2011年太湖大气TN、TP沉降量明显上升,湿沉降与2009年—2010年余辉等^[12]的监测数据相比也均有所上升,见表2。

20多年来,太湖大气沉降输入太湖的TN、TP量一直呈上升的趋势,与2002年—2003年相比,大气沉降入湖的TN与TP分别增加了112%与77%;与2009年—2010年湿沉降相比,大气湿沉降入湖的TN与TP分别增加了21%与29%。因此,在控制入湖河流N、P输入的同时,由大气沉降引发的入湖N、P污染也应受到重视。

表2 太湖TN和TP年大气沉降总量
Table 2 Annual fluxes of atmospheric deposition of TN and TP to Lake Taihu

年份	湿沉降		年总沉降量	
	TN	TP	TN	TP
1987年—1988年 ^[16]	2 527	55	2 948	88
2002年—2003年 ^[6]	7 852	203	9 881	715
2009年—2010年 ^[12]	10 868	247		
2011年	13 150	318	20 978	1 268

3 结论

(1) 2011年太湖3个采样点中N大气干沉降量为1 684 t~3 234 t,年沉降量为7 828 t。N干沉降主要为可溶性N,占TN的77.2%,其中主要为

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$,占TN的51.1%,西太湖和西山的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 大气沉降量较高,附近农田施肥过程中 NH_3 挥发进入到大气是造成干沉降中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量较高的原因之一。太湖N沉降主要以湿沉降为主,降水输入太湖的TN占全年大气输入的62.7%,其中以西太湖的沉降比例最高,达到71.6%,远高于杨湾与西山。

(2) 太湖P的大气输入主要以干沉降为主,3个采样点P大气干沉降量为171 t~404 t,太湖磷年干沉降量为950 t,占大气输入太湖比例74.9%。富营养化较严重的西太湖与杨湾DTP大气沉降量较高,分别达到83.9%与86.4%,应引起足够的重视。因此,大气沉降是太湖N、P的重要来源之一,为了更好地控制太湖富营养化,减少大气沉降N、P的输入是其中一个重要的环节。

(3) 由于太湖设置的采样点仅为3个,其中西太湖与杨湾2个采样点的大气N、P沉降量明显高于西山沉降量,且没有进行全年的监测,因此沉降量数值经加权计算后与太湖真实大气沉降量存在一定的误差。估算方法有一定的不足之处,今后需增加更多的采样点与全年连续采样减小误差以推求全年N、P沉降量变化。

[参考文献]

- [1] MCCOMB A J. Eutrophic shallow estuaries and lagoons [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995: 126 - 127.
- [2] LIVINGSTON R J. Eutrophication processes in coastal systems: origin and succession of plankton blooms and effects on secondary production in gulf coast estuaries [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002: 145 - 147.
- [3] 黄智华, 薛滨, 逢勇. 太湖水环境演变与流域经济发展关系及趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5): 627 - 631.
- [4] 靳晓莉, 高俊峰, 赵广举. 太湖流域近20年社会经济发展对水环境影响及发展趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 298 - 302.
- [5] PAERL H W, XU H, MCCARTHY M, et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N&P) management strategy [J]. Water Research, 2011, 45(5): 1973 - 1983.
- [6] 杨龙元, 秦伯强, 胡维平, 等. 太湖大气氮、磷营养元素干沉降率研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(2): 104 - 110.
- [7] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future [J]. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153 - 226.

(下转第42页)

京市典型区域电磁辐射功率密度平均值低于《电磁辐射防护规定》(GB 8702-1988) 中 $40 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的电磁环境限值标准,与普测结果一致。

(2) 从区域功能判断,经数据分析可得,典型区域的环境电磁辐射水平:商业区 > 居住区 > 郊区,且商业区、居住区环境电磁辐射水平随着时间变化趋势一致,白天和晚间商务活动高峰期环境电磁辐射水平有明显升高。由此判断,通讯设施的应用,影响着环境电磁辐射水平。

(3) 从时间段判断,白天环境调查辐射水平普遍大于夜间,存在一定规律性。在 08:00—18:00 时段,商业区环境电磁辐射水平明显升高;居住区、郊区电磁辐射水平略有上升。此时段,人们主要处于工作中,各种电磁辐射设施,如电视塔、通信基站等运行负荷上升,特别是商业区,移动通信话务量急剧增加,是环境电磁辐射贡献源。

在 19:00—21:00 时段,居住区、郊区环境电磁辐射水平出现小高峰,商业区环境电磁辐射水平下降明显。此时间段,商业区工作人员大部分下班,移动通信话务量降低明显,居住区、郊区人员数量开始增加,移动通信和广播电视设施运行负荷增加,环境电磁辐射水平明显上升。

在 22:00—07:00 时段,典型区域的电磁辐射水平较低,并有下降趋势。此时段,大部分人处于休息中,各种电磁辐射设施,如电视塔、通信基站等运行负荷明显下降,环境电磁辐射水平有降低趋势。

综上所述,南京市典型区域各时间段的环境电磁辐射水平和人们活动变化规律有关,南京市各典

型区域环境电磁辐射水平总体较低,但受人类活动影响较明显,其中通信基站运行影响最为普遍和显著,城市人口密集区影响大于郊区。

4 结语

通过调查,尽管通讯基站遍布南京市各处,南京市辐射功率密度整体水平满足《电磁辐射防护规定》(GB 8702-1988) 中 $40 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的电磁环境限值标准要求,大部分地区低于 $2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,少数点位受广播、电视发射设备影响在 $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。对典型区域监测分析,通讯、广播、电视等对环境辐射功率密度变化有一定影响。建议加强对辐射电磁设备的规划和管理,倡导节约资源,引导企业资源共享,特别是运营商在基站建设中能统一规划,共建共享,建设绿色基站。

[参考文献]

- [1] International committee on electromagnetic safety (SCC39). IEE standard for safety Levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields 3 kHz to 300 GHz [S]. USA: The Institute of Electronics Engineers, 2006: 12-20.
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz) [S]. Health Physics, 1998, 74(4): 494.
- [3] ICEMS. Benevento resolution [S/OL]. [2006-09-19]. http://www.icems.eu/.

本栏目责任编辑 李文峻 薛光璞

(上接第 24 页)

- [8] PAERL H W, DENNIS R L, WHITTALL D R. Atmospheric deposition of nitrogen: implications for nutrient over-enrichment of coastal waters [J]. Estuaries and Coasts, 2002, 25(4): 677-693.
- [9] TAMATAMAH R A, HECKY R E, DUTHIE H C. The atmospheric deposition of phosphorus in Lake Victoria (East Africa) [J]. Biogeochemistry, 2005, 73(2): 325-344.
- [10] 宋玉芝, 秦伯强, 杨龙元, 等. 大气湿沉降向太湖水生生态系统输送氮的初步估算 [J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 226-230.
- [11] 翟水晶, 杨龙元, 胡维平. 太湖北部藻类生长旺盛期大气氮、磷沉降特征 [J]. 环境污染与防治, 2009, 21(4): 5-10.

- [12] 余辉, 张璐璐, 燕姝雯, 等. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率 [J]. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1210-1219.
- [13] ZHAI S J, YANG L Y, HU W P. Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in Northern Lake Taihu, China [J]. Environmental Management, 2009, 44(4): 542-551.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 张落成, 刘存丽. 太湖流域土地利用变化特征与机制分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(10): 1205-1210.
- [16] 黄漪萍, 范成新, 濮培民, 等. 太湖水环境及其污染控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 200-201.