

云南阳宗海大气氮、磷沉降特征^{*}

余功友¹, 杨常亮^{2**}, 刘楷³, 杨海燕⁴, 张佳丽⁴

(1: 云南大学建筑与规划学院, 昆明 650091)

(2: 云南大学生态学与环境学院, 昆明 650091)

(3: 云南平正环保科技有限公司, 昆明 650221)

(4: 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091)

摘要: 大气氮、磷沉降是湖泊水体氮、磷入湖的重要途径之一。为了解阳宗海氮、磷沉降对湖泊富营养化的潜在影响, 于2012年5月—2014年4月通过监测阳宗海大气氮、磷沉降, 估算氮、磷的大气沉降通量, 揭示阳宗海大气氮、磷沉降随时间变化的特征, 分析其来源、影响因素等。由于阳宗海是磷限制湖泊, 本研究在估算大气氮、磷沉降通量的基础上, 特别比较了大气磷沉降入湖量与非点源磷的入湖量, 以此评估大气沉降输入磷对湖泊富营养化的潜在影响。研究表明: 阳宗海总氮年平均沉降通量为248 mg/m², 春、夏、秋和冬季平均分别为200、306、274和214 mg/m², 其中夏季沉降通量最大, 原因与降雨量增加有关; 总磷年平均沉降通量为24 mg/m², 春、夏、秋和冬季平均分别为18、31、19和27 mg/m²。大气磷沉降与输入阳宗海的总磷量相比很小, 对阳宗海富营养化影响较小。

关键词: 大气沉降; 氮; 磷; 阳宗海

Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorous in Lake Yangzonghai, Yunnan Province

YU Gongyou¹, YANG Changliang^{2**}, LIU Kai³, YANG Haiyan⁴ & ZHANG Jiali⁴

(1: School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650091, P.R.China)

(2: School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650091, P.R.China)

(3: Yunnan Pingzheng Environmental Technology Co. Ltd., Kunming 650221, P.R.China)

(4: Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, P.R.China)

Abstract: Atmospheric deposition is one of the important pathways for nitrogen (N) and phosphorus (P) transported into lakes. To understand the potential impact of N and P from atmospheric depositions on the eutrophication of Lake Yangzonghai, this research investigated the temporal variation and estimated the fluxes of N and P from atmospheric depositions in the lake catchment. The sources and impact factors of the N and P depositions were analyzed by monitoring data from May 2012 to April 2014. Since Lake Yangzonghai is a P-limited lake, this study especially compared the P fluxes from N and P atmospheric deposition with that from non-point sources, and assessed the potential P-impact from atmospheric deposition on the eutrophication lake. The results showed that the average annual deposition flux of total nitrogen was 248 mg/m², and seasonal deposition fluxes in spring, summer, autumn and winter were 200, 306, 274 and 214 mg/m², respectively. The peak of N flux occurred in summer because of the increased rainfall. The annual average P deposition flux was 24 mg/m², and seasonal deposition fluxes in spring, summer, autumn and winter were 18, 31, 19 and 27 mg/m², respectively. Compared with the non-point P-load source, P-input from atmospheric deposition seemed very small, and would have little effect on the eutrophication of the lake.

Keywords: Atmospheric deposition; nitrogen; phosphorus; Lake Yangzonghai

* 国家自然科学基金项目(51168047)资助。2016-04-23 收稿; 2016-10-12 收修改稿。余功友(1991~), 男, 硕士研究生; E-mail: yugyouzerojue@163.com.

** 通信作者; E-mail: YangCL227@163.com.

大气沉降是化学物质进入地表水体的一个重要途径,包括干沉降和湿沉降^[1]. 近年来,化石燃料、化肥的大量生产和使用,使排入大气中的含氮化合物急剧增加,造成氮循环的改变,对生态系统产生了重大影响. 有研究表明,大气沉降是氮、磷营养元素输入水生生态系统的重要途径,是水生生物生长所需营养元素的重要来源^[2]. 大气沉降带来的大量含氮化合物会对浮游植物生长和种群结构产生重要影响^[3-5]. 也有人指出,大气氮沉降已经成为一些河口、沿海海域和淡水水体富营养化的重要污染源^[6-8].

早期,对大气中磷元素影响的认识存在分歧,主要是由于大气沉降的磷元素与其他来源(如农业径流等)的磷元素相比,所占的比例较低,所以针对大气营养盐沉降很少有人研究磷沉降^[9]. 而又有部分研究认为,磷沉降是湖泊水体磷的重要来源^[10-13]. 近年来,由于大气污染的加剧,使得大气磷沉降成为研究的热点之一,国内外对各种生态系统如湖泊、海洋、草地和森林等大气沉降的研究均有报道^[14-16].

尽管氮、磷的大气沉降与其他导致水体富营养化的来源相比量较少,但大气氮、磷沉降对湖泊水体氮、磷浓度还是有一定贡献的. 有研究表明,当氮沉降通量在 $25 \times 10^2 \text{ mg/m}^2$ 以内时,大部分氮被保留在生态系统中,但超过这一数值时,就会出现饱和状态^[17],过量的氮沉降会加速土壤的酸化和水体的富营养化^[18]. 因此,了解湖泊氮、磷沉降特征,估算大气氮、磷沉降通量,对湖泊的氮、磷污染防治具有重要意义,特别是对阳宗海这种磷限制型深水湖泊,了解磷沉降通量对湖泊富营养化防治具有现实意义.

大气干、湿沉降的观测方法包括监测布点、采样方法和样品的分析测定. 传统的人工采样是在采样现场一定高度放置采样缸,间隔一段时间后将样品取回,在实验室进行分析. 如今大气沉降采样方法已经由传统的人工采样逐渐向自动采样发展,自动连续分别采集大气干沉降和湿沉降. 采样缸的容器规格和材质的选择可能差异很大,但是它们的功能都是确保能存储采集到的样品,防止样品的遗失;并且根据实验目的的不同,在采样缸内添加乙二醇或者滤膜. 乙二醇的作用是防冻剂、保湿剂,并能保证采样缸内无藻类、微生物的生长,滤膜的作用是吸附固定并防止降尘被再次吹扬,方便后续研究^[19-21]. 我国大气干湿沉降采样方法主要依照《环境空气降尘的测定重量法》(GB/T 15265—1994),其中规定集尘缸为内径 $15 \pm 0.5 \text{ cm}$ 、高 30 cm 的圆筒形平底玻璃缸;李军等^[22]依据欧盟 EMEP 计划的设计原则,自行制作干湿沉降采样器,采样器由一个上部不锈钢倒圆锥形接口和下部放有石英滤膜的收集器组成. 英国的标准规定集尘器由有金属网盖的玻璃漏斗和集尘瓶连接而成^[23]. 集尘缸的放置高度视不同地区的环境状况而定,主要是避免平台扬尘的影响. 监测布点的原则类似,主要考虑可操作和具有代表性的地方,且考虑集尘器不易损坏和便于更换. 目前,国内大气干湿沉降自动采集器主要以《环境空气降尘的测定重量法》(GB/T 15265—1994)、《总悬浮颗粒物采样器》(JJG 943—2011)、《大气采样器》(JJG 956—2000)、《环境空气采样器技术要求及检测方法》(HJ/T 375—2007)等为核心,加入智能和机械元件组成,主要由传感器、机械驱动系统、干沉降收集筒、湿沉降收集筒、电源组件、连杆和盖子、骨架等原件组成,如 TE-78-100、HB-319-H-200、BUS125/KE 和 HY.PSC-I 等产品. 自动采集器的特点是自动化程度高、性能好、灵敏度高、运行稳定高效、抗干扰能力强.

大气氮湿沉降的测定方法有降水采集法和离子交换树脂法. 降水采集法是收集雨水然后测定氮素的平均浓度. 离子交换树脂法是利用离子交换后再提取树脂上的氮素测定其含量. 氮素干沉降的测定方法有直接测定法和间接测定法. 直接测定法是用采样缸收集一定的干沉降样品,然后除以采样面积和时间计算得到干沉降通量. 大气氮素干沉降通量还可以通过分别测定含氮物质浓度和沉降速率来间接计算. 总氮(TN)浓度一般采用湿法氧化法、紫外光氧化法和高温催化氧化法等进行分析^[21]. 湿法氧化法是使用化学氧化剂(过硫酸盐或过氧化氢)将有机氮氧化分解为硝态氮,然后采用镉柱还原-对氨基苯磺酰胺比色法进行分析;紫外光氧化法是利用紫外光将有机氮光解为无机离子,然后使用离子色谱法或分光光度法测定;高温燃烧法是通过高温催化氧化将有机氮转化为氧化氮气体,然后采用化学发光或分光光度法分析产生的氧化氮. 另外一种处理方法是有机氮燃烧还原为氮气,测定产生氮气的压力变化来进行分析^[20]. 大气沉降总磷(TP)浓度的测定方法有传统的分光光度法、流动注射分析法(FIA)和电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)^[24]. 传统的分光光度法常用的是钼酸铵分光光度法,该方法是在酸性条件下,正磷酸盐与钼酸铵、酒石酸锑氧钾反应,生成磷钼杂多酸,被抗坏血酸还原后变成蓝色络合物,最后在 700 nm 比色定量;FIA 法测定 TP 浓度以钼酸铵分光光度法为基础,不同之处是采用在线过硫酸盐或紫外消解方法,生成的络合物在 880 nm 波长比色定量;ICP-AES 法是利用氩等离子体产生的高温使测定物完全分解形成激发态的原子和离子,

由于激发态的原子和离子不稳定,外层电子会从激发态向低的能级跃迁,发射特征谱线,由于光强度与待测元素浓度呈正比,通过光栅等分光后,检测器检测 TP 特定波长的强度就可以得到 TP 浓度.

阳宗海是一个平均水深为 20 m 的高原深水湖泊,海拔 1769.90 m,平均水面面积 31.6 km²[25]. 正常年份雨季于 5 月下旬开始至 10 月上旬结束,降水量占全年降水量的 85% 左右,而降雨主要集中在 6—8 月[26],多年平均降雨量为 912.2 mm. 阳宗海主导风向为西南风,流域多年平均风速为 2.4 m/s[27].

阳宗海近年来水体呈现富营养化趋势[28],有必要进行湖泊 N、P 的输入与输出平衡研究及各个输入途径的定量研究. 已有学者对流域地表径流的 N、P 入湖贡献进行了定量研究[29],但是迄今尚无对阳宗海大气沉降定量研究的报道,而大气沉降在许多湖泊 N、P 负荷中常常占有重要的比率. 因此,本研究针对阳宗海 N、P 大气沉降入湖负荷进行了为期 2 年的定量观测和研究,分析了大气氮、磷沉降的月变化和季节变化特征,计算了阳宗海 TN、TP 沉降通量以及大气磷沉降占 TP 入湖量的比例,旨在评估该途径 N、P 通量的大小,以此分析大气沉降过程对阳宗海水体富营养化的潜在影响,为该湖泊富营养化防治提供科学依据.

1 方法

1.1 采样与测定

在阳宗海流域南部的阳宗镇(A)、中部的七甸乡(B)和北部的汤池镇(C)各设置 1 个降尘监测点(图 1),每个监测点放置 2 个降尘缸作为平行样. 大气沉降样品的采集按照国家标准《环境空气降尘的测定重量法》(GB/T 15265—1994)进行. 大气沉降样品采用 135 mm×350 mm、缸口面积为 1.43×10⁻² m² 的圆筒型玻璃降尘缸收集. 采样前缸体用体积比为 10% 的盐酸浸泡 24 h,用自来水冲洗,然后再用去离子水多次荡涤,倒置晾干后使用. 采样时加入去离子水做收集液,液体以占满缸底为准,加入量视当地各季节气候条件而定. 降尘监测点周围开阔无遮挡物,且放置于建筑屋顶 1.2 m 处. 每月月初放置采样缸,月末取回采样缸并及时测定 TP 和 TN 浓度.

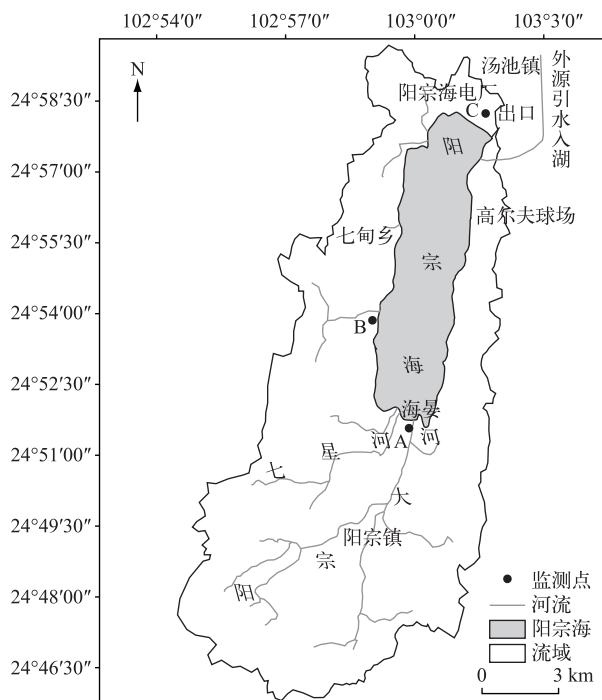


图 1 监测布点和阳宗海流域的污染源

Fig.1 Monitoring sites and pollution sources in Lake Yangzonghai watershed

监测采样历时两年(2012年5月—2014年4月). 样品中的TN浓度根据环境保护部标准《水质—总氮的测定—碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)进行测定,TP浓度根据国家标准《水质—总磷的测定—钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)进行测定^[30].

1.2 沉降通量的计算

谢迎新等^[31]认为缸内存在微生物活动和环境温度的影响,收集的样品若没有及时处理就可能产生硝化或者反硝化作用,从而导致沉降样品总氮含量降低. 本研究不考虑降尘缸内可能发生的物理化学及生物过程,根据采样缸的体积和测得的TN、TP浓度计算大气月沉降通量. 年总沉降通量为月沉降通量的总和,计算公式为:

$$M = C \cdot V / S \quad (1)$$

$$Y = \sum_{n=1}^{12} M \quad (2)$$

式中, M 为大气月总沉降通量(mg/m^2), Y 为大气年总沉降通量(mg/m^2), C 为总沉降样品测得的TN、TP浓度(mg/L), V 为总沉降样品的体积(L), S 为降尘缸的底面积(m^2).

1.3 数据相关性分析

描述事物之间非唯一性、非直接性和普遍性关系称之为相关关系,而揭示、分析和解释它们之间关系的强弱和程度差异的数理统计方法称之为相关分析法. 为了验证大气沉降与降雨之间的相关关系,本文利用Excel软件对不同时段大气氮、磷沉降与降雨量进行相关分析.

2 结果与分析

2.1 大气氮、磷沉降通量的变化

2012年5月—2014年4月阳宗海大气TN和TP月总沉降通量随时间的变化都很明显. 监测期间,每年阳宗海TN月总沉降通量在夏初或秋末出现峰值,最小值出现在雨季末期的9月或10月. TN月总沉降通量随时间的变化波动比较大,监测到的最大值和最小值分别出现于2013年10月($658 \text{ mg}/\text{m}^2$)和9月($33 \text{ mg}/\text{m}^2$),两者相差约20倍. 监测期间,每年阳宗海TP月总沉降通量在夏初或冬初出现峰值,3月或9月出现最小值;监测到的TP月总沉降通量的最大值和最小值分别出现在2013年的6月($57 \text{ mg}/\text{m}^2$)和3月($6 \text{ mg}/\text{m}^2$),两者之间相差约10倍(图2).

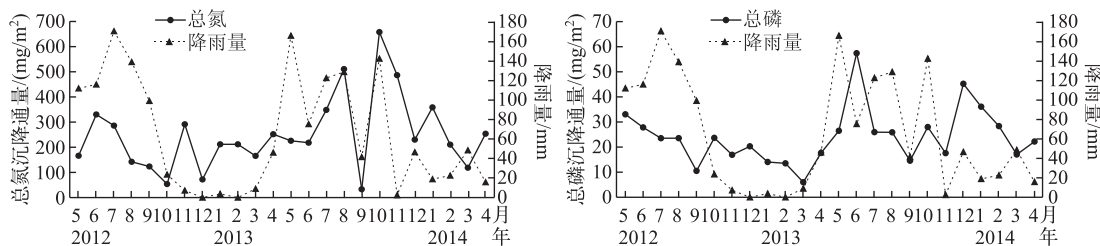


图2 总氮和总磷沉降通量的月变化

Fig.2 Monthly variations of total nitrogen and total phosphorus deposition fluxes

大气干湿沉降氮在不同季节、不同气候区域以及不同生态条件下受到较多因素影响^[31],主要因素有:来源、降雨、风速和风向等. 大气中氮、磷营养元素主要来自农业施用化肥和工业企业排放进入大气的废气. 工厂排放与企业内部生产、工况等情况有关,一般不具有周期性;农业来源相对稳定,具有周期性;焦锋等^[32]认为农田可能是大气氮的主要来源之一. 阳宗海每年2、3月为农耕期,在5、6月又有部分农耕,导致春季和夏季大气中氮、磷浓度升高,从而使得2、3月和5、6月的大气氮、磷沉降通量增加. 贾钧彦等^[33]研究发现藏东南地区降雨量与氮沉降量有极强的正相关性,氮沉降量的季节性差异主要与相应时期降水中各形态氮的月均浓度和降雨量有关. 据了解,云南自2009年开始历时4年的干旱,2012年阳宗海附近的宜良县年总降雨量只有624 mm,2013年下半年降雨开始恢复正常. 从数据上看,2012年5月—2014年4月历时24个月,前12个月氮沉降通量为 $192 \text{ mg}/\text{m}^2$,后12个月为 $304 \text{ mg}/\text{m}^2$;而前12个月磷沉降通量为 $19 \text{ mg}/\text{m}^2$,后12个月

为 29 mg/m^2 . 针对大气氮、磷沉降通量与降雨量的数据, 取置信度 $\alpha=0.05$, 查相关系数临界值 ($f=n-2$), 当 $n=24$ 时临界值为 0.404, 当 $n=12$ 时临界值为 0.576. 计算得出每月 TN 沉降通量与降雨量的相关系数 $\rho=0.296$, 说明该地区 TN 的沉降通量与降雨量的相关性较低; 同样计算每月 TP 沉降通量与降雨量的 $\rho=0.266$, 说明该地区 TP 沉降通量与降雨量的相关性也较低. 其中, TN 沉降通量与前 12 个月降雨量的 $\rho=0.255$, 小于后 12 个月的 $\rho=0.343$, 而 TP 通量沉降则与其相反, 前 12 个月 $\rho=0.552$, 而后 12 个月的 $\rho=0.077$, 相关性都很低. 前后 12 月比较说明 TN 沉降通量中湿沉降略大于干沉降, 而 TP 沉降中干沉降较多. 风向和风速对于干沉降的影响很大^[34], 一方面影响大气中颗粒物等的迁移扩散, 另一方面会导致扬尘, 从而加大干沉降量.

前 12 个月降雨量较少时, 阳宗镇、汤池镇和七甸乡 3 个采样点的 TN 沉降通量差异较大, 波动明显; 后 12 个月, 当降雨量恢复到正常年份的水平时, 3 个采样点的 TN 沉降通量波动具有明显的一致性, 且前后对比可以看出, 降雨量有助于增加 TN 沉降. 阳宗镇、汤池镇和七甸乡 3 个采样点的 TP 沉降在 24 个月都没有明显的一致性, 波动也不具有规律性 (图 3).

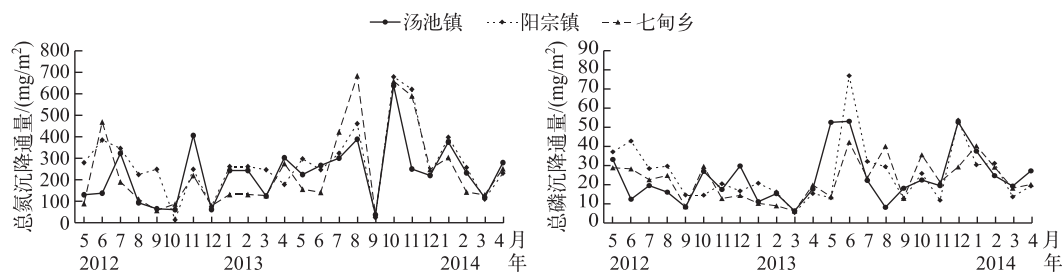


图 3 各采样点总氮和总磷沉降通量的月变化

Fig.3 Monthly changes of total nitrogen and total phosphorus deposition fluxes at each sampling site

对各个采样点氮、磷沉降的相关性进行分析发现, 24 个月内 3 个采样点之间 TN 沉降通量的 ρ 在 0.68~0.82 之间, TP 沉降通量的 ρ 在 0.41~0.69 之间, 相关性都较高. 其中, TN 和 TP 沉降通量都是阳宗镇与七甸乡的相关性最高, 而七甸乡与汤池镇的相关性相对较差, 这可能与采样点所处的局部环境有关, 3 个采样点 TP 沉降通量的相关性均较小, 说明磷沉降受到局部环境条件影响较明显.

我国气象部门将四季划分为: 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12—2 月为冬季. 按季节统计, 春、夏、秋和冬季 TN 的沉降量分别为 200, 306, 274 和 214 mg/m^2 , 季平均沉降通量为 248 mg/m^2 . 而春、夏、秋和冬季 TP 的沉降量分别为 18, 31, 19 和 27 mg/m^2 , 季平均沉降通量为 24 mg/m^2 . 将大气氮磷沉降量与降雨量对比分析 (图 4), 发现 TN、TP 沉降通量都与降雨量变化趋势不一致. TN 沉降通量在春、秋和冬季随着降雨的增加而增加, 而夏季则随着降雨量的增加而减少; TP 沉降则表现为春季和夏季随着降雨量的增加而减少, 秋季和冬季则随着降雨量的增加而增加. 王江飞等^[30]研究杭嘉湖地区大气氮干湿沉降得出的干沉降与湿沉降的比例为 1:1, 还有一些国内外学者研究发现磷沉降以干沉降为主^[30, 35-36], 本研究结论与其不同; 陈瑾等^[37]研究惠州大亚湾的氮沉降得到的结论为氮沉降存在季节变化规律, 与本研究结论类似, 但不同的是本研究发现磷也存在季节变化规律.

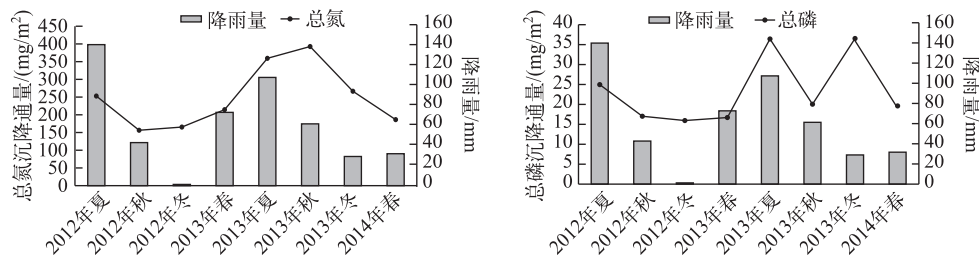


图 4 总氮和总磷沉降通量的季节变化

Fig.4 Seasonal changes of total nitrogen and total phosphorus deposition fluxes

2.2 大气沉降的地域差异

对比国内其他地区大气 TN、TP 沉降通量(表 1),虽然不同的时间、下垫面、气候因素及实验方法在一定程度上影响数据的可比性,但是区域之间的横向对比对了解氮、磷沉降通量大小仍然有意义.从数值上看,阳宗海大气 TN、TP 年平均总沉降通量水平较低,比邻近的抚仙湖还低(表 1).阳宗海与抚仙湖、星云湖距离较近,气候差异不大.金星等^[38]调查发现星云湖和抚仙湖附近的磷化工企业共有 20 家,认为星云湖比抚仙湖总沉降更高的原因是磷化工企业距离湖面的距离、地形和湖陆风局地条件造成的影响.其中江城工业片区和螺蛳铺工业片区对星云湖的影响十分明显,而对抚仙湖的影响轻微,主要是风向导致的.阳宗海四面环山,流域内仅有的 1 家磷化工企业已经停产多年,1 家燃煤电厂位于汤池镇,即阳宗海的北面.由于阳宗海主导风向为西南风,在上风向没有磷化工企业,所以大气磷沉降的来源主要是农业面源.相比同时受工业源和农业源影响的抚仙湖和星云湖,阳宗海大气氮、磷沉降通量较低是合理的.

2.3 大气沉降中 TP 沉降的贡献率

阳宗海属于高原深水湖泊,根据杨常亮等^[48]的研究结果,磷是阳宗海水体富营养化的限制因子(氮磷比为 26.7:1),所以本研究着重探讨大气沉降对阳宗海磷负荷的贡献率.

由于近年来阳宗海流域的几个工业企业的污水均不入湖,而是输送到污水处理厂进行处理后直接排到流域外,而且入湖河流阳宗大河、七星河等旱季基本断流,所以该流域的点源污染基本可以忽略不计.因此,总入湖量近似等于非点源入湖量.本文通过与杨亮秀^[29]采用 SWAT 模型计算的 2006、2007 和 2010 年阳宗海流域非点源入湖 TP 负荷(表 2)进行对比,评价大气磷沉降对阳宗海磷输入的影响.

表 2 阳宗海流域非点源入湖负荷^[29]

Tab.2 Load of non-point source into the Lake Yangzonghai watershed

指标	2006 年	2007 年	2010 年	平均值
平均径流量/(m ³ /s)	0.36	0.66	0.18	0.43
入湖总磷负荷/(t/a)	80.23	171.34	64.52	105.36

阳宗海平均水面面积为 3.16×10⁵ m²,由于 TP 沉降通量平均值为 24 mg/(m²·a),则由本研究得出的 TP 沉降通量的平均值乘以湖面面积可得出大气 TP 沉降量为 0.0076 t/a.而阳宗海非点源年入湖 TP 量为 105.4 t,相比于农业施用化肥对阳宗海输入磷负荷的影响,大气沉降输入的影响较小,可以忽略不计,所以阳宗海富营养化的防治工作重点应该是控制周围农业面源的磷污染.

3 结论

- 1) 阳宗海 TN 年平均总沉降通量为 248 mg/(m²·a),TP 年平均总沉降通量为 24 mg/(m²·a).
- 2) 阳宗海流域氮、磷大气总沉降水平比邻近抚仙湖流域、星云湖低,这与流域内缺少氮、磷大气污染源有关.

表 1 国内一些地区总氮和总磷沉降通量的对比

Tab.1 Comparison of total nitrogen and total phosphorus deposition fluxes in some areas of China

地区	总氮沉降通量/ (mg/(m ² ·a))	总磷沉降通量/ (mg/(m ² ·a))	数据来源
上海地区	5810	—	张修峰 ^[39]
太湖	4226	306	杨龙元等 ^[40]
南京近郊	6600	—	邓君俊等 ^[41]
太湖梅梁湾	2652~3300	61~107	翟水晶等 ^[42]
重庆	4560~5490	—	袁玲等 ^[43]
江西鹰潭	1105	—	崔键等 ^[44]
抚仙湖	—	80	
星云湖	—	444	金星等 ^[38]
杞麓湖	—	89	
珠江口	3588	49	樊敏玲等 ^[45]
长乐江流域	8180	198	张峰 ^[46]
珠江三角洲	5066	47	刘爱萍等 ^[47]
杭州	5036	65	
嘉兴	5586	70	王江飞等 ^[30]
湖州	4951	67	
阳宗海	248	24	本研究

3) 阳宗海流域 TP 沉降入湖量为 0.0076 t. 大气 TP 沉降量与入湖 TP 量相比, 大气沉降带入的 TP 量贡献率较低, 潜在影响较小, 防治富营养化应该加强非点源磷输入的控制。

4 参考文献

- [1] Chen Nengwang, Hong Huasheng, Zhang Luoping *et al.* Wet deposition of atmospheric nitrogen in Jiulong River Watershed. *Environmental Science*, 2008, **29**(1): 38-46. [陈能汪, 洪华生, 张珞平. 九龙江流域大气氮湿沉降研究. 环境科学, 2008, **29**(1): 38-46.]
- [2] Migon C, Sandroni V. Phosphorus in rainwater: Partitioning inputs and impacts on the surface coastal ocean. *Limnol Oceanogr*, 1999, **44**: 1160-1165.
- [3] Liu Changling, Chen Hongtao, Ren Hongbo *et al.* Nutrient elements in wet deposition (precipitation) from the Yellow Sea and the East China Sea regions. *Marin Environ Sci*, 2003, **22**(3): 26-30. [刘昌岭, 陈洪涛, 任宏波等. 黄海及东海海域大气湿沉降(降水)中的营养元素. 海洋环境科学, 2003, **22**(3): 26-30.]
- [4] Zhang Jinliang, Chen Ning, Yu Zhiwei *et al.* Ion balance and composition of atmospheric wet deposition (precipitation) in Western Yellow Sea. *Marin Environ Sci*, 2009, **19**(2): 10-13. [张金良, 陈宁, 于志尉等. 黄海西部大气湿沉降(降水)的离子平衡及离子组成研究. 海洋环境科学, 2009, **19**(2): 10-13.]
- [5] Chen Nengwang, Hong Huasheng, Zhang Luoping. Dry deposition of atmospheric nitrogen to Jiulong River watershed in southeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(8): 2602-2607. [陈能汪, 洪华生, 张珞平. 九龙江流域大气氮干沉降. 生态学报, 2006, **26**(8): 2602-2607.]
- [6] Whittall D, Hendrickson B, Paerl H. Importance of atmospherically deposited nitrogen to the annual nitrogen budget of the Neuse River estuary, North Carolina. *Environ Int*, 2003, **29**: 393-399.
- [7] Zhai SJ, Yang LY, Hu WP. Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in Northern Lake Taihu, China. *Environ Manage*, 2009, **44**: 542-551.
- [8] Chen Jin, Lu Ping, Chen Zhongying *et al.* Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus at Daya Bay in Huizhou during spring and summer. *J Trop Oceanograph*, 2014, **33**(2): 109-114. [陈瑾, 卢平, 陈中颖等. 惠州大亚湾春夏季大气氮磷沉降的研究. 热带海洋学报, 2014, **33**(2): 109-114.]
- [9] Jin Xiangcan, Tu Qingying eds. Specifications for lake eutrophication survey (2nd Edition). Beijing: China Environmental Science Press, 1990. [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第2版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [10] Jassby AD, Reuter JE, Axler RP *et al.* Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in the annual nutrient load of Lake Tahoe. *Water Resources Research*, 1994, **30**: 2207-2216.
- [11] Peters NE, Reese RS. Variations of weekly atmospheric deposition for multiple collectors at a site on the shore of Lake Okeechobee. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**: 179-187.
- [12] Guerzoni S, Chester R, Dulac R *et al.* The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 1999, **44**: 147-190.
- [13] Winter JG, Dillon PJ, Futter MN. Total phosphorus budgets and nitrogen loads: Lake Simcoe, Ontario (1990 to 1998). *Journal of Great Lakes Research*, 2002, **28**: 301-314.
- [14] Wang Linjian, Liu qian, Zhao Heng *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in agroecosystem in red soil region of Jiangxi province. *Acta Pedol Sin*, 2008, **45**(2): 280-287. [王体健, 刘倩, 赵恒等. 江西红壤地区农田生态系统大气氮沉降通量的研究. 土壤学报, 2008, **45**(2): 280-287.]
- [15] Fan Jianling, Hu Zhengyi, Zhou Jing *et al.* Comparative study on the observation of atmospheric nitrogen deposition in a forestland. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 786-792. [樊建凌, 胡正义, 周静等. 林地大气氮沉降通量观测对比研究. 中国环境科学, 2013, **33**(5): 786-792.]
- [16] Liu Chanfang. Study on the influence of dry and wet deposition of atmosphere nitrogen on marine environment. *The Journal Quality of Goods, Building and Development*, 2013, (8): 109. [刘婵芳. 大气氮干湿沉降对海洋环境影响研究. 商品与质量·建筑与发展, 2013, (8): 109.]
- [17] Fan HouBao, Huang Yu. Ecophysiological mechanism underlying the impacts of nitrogen saturation in terrestrial ecosystems on plants. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, **32**(4): 395-402. [樊后保, 黄玉. 陆地生态系统氮饱和和对植物影响的生理生态机制. 植物生理与分子生物学学报, 2006, **32**(4): 395-402.]

- [18] Magill AH, Aber JD, Berntson GM *et al.* Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests. *Ecosystems*, 2000, **3**(3): 238-253.
- [19] Uematsu M, Duce RA, Prospero JM. Deposition of atmospheric mineral particles in the North Pacific Ocean. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1985, **3**(1): 123-138.
- [20] Burkhardt J, Grantz DA eds. Plants and atmospheric aerosols. *Progress in Botany*, 2016, **78**: 369-406. DOI: 10.1007/123-2016-12.
- [21] Bleta A, Nastos PT, Kaminski U *et al.* Impacts of coarse atmospheric particulate matter between 2.5 and 80 μm on respiratory admissions in Heraklion, Crete Island, Greece. *Perspectives on Atmospheric Sciences*, 2017: 1117-1122. DOI: 10.1007/978-3-319-35095-0_160.
- [22] Li Jun, Zhang Gan, Qi Shihua *et al.* Atmospheric deposition of PAHs to a small urban lake, Lake Luhu, Guangzhou. *J Lake Sci*, 2003, **15**(3): 193-199. DOI: 10.18307/2003.0301. [李军, 张干, 祁士华等. 广州麓湖大气多环芳烃的干湿沉降. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 193-199.]
- [23] Wu Pengming ed. Quality assurance handbook of ambient air monitoring. Beijing: China Environmental Science Press, 1989. [吴鹏鸣. 环境空气质量监测质量保证手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.]
- [24] Shi Jinhui. Atmospheric deposition of nitrogen species over the China Sea and its impact on a spring bloom [Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. [石金辉. 中国近海大气沉降中氮组分的分布特征及对春季水华事件的影响[学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [25] Yang Changliang, Li Shiyu, Liu Rengbing *et al.* An analysis on external loading of nitrogen and phosphorus in Lake Yangzonghai. *Shanghai Environmental Science*, 2014, (2): 47-52. [杨常亮, 李世玉, 刘仍兵等. 阳宗海外源氮磷负荷入湖量分析. 上海环境科学, 2014, (2): 47-52.]
- [26] Bi Jianpei, Liu Chen, Li Shaozuo. Variation of water quality of Yangzonghai Lake affected by arsenic pollution. *Water Resources Protection*, 2014, **30**(1): 84-89. [毕建培, 刘晨, 黎绍佐. 阳宗海神污染水质变化过程分析. 水资源保护, 2014, **30**(1): 84-89.]
- [27] Liu Weihong. Study on water environmental carrying capacity in Yangzonghai Catchment [Dissertation]. Kunming: Yunnan University, 2009. [刘卫红. 阳宗海流域水环境承载力研究[学位论文]. 昆明: 云南大学, 2009.]
- [28] Li Xiaoming, Li Shiyu. Dynamic characteristics of nitrogen, phosphorus, chlorophyll a and eutrophication trend in Yangzonghai Lake. *Water Resources Protection*, 2014, **30**(4): 43-46, 52. [李晓铭, 李世玉. 阳宗海叶绿素 a、磷、氮动态特征及富营养化趋势. 水资源保护, 2014, **30**(4): 43-46, 52.]
- [29] Yang Liangxiu. Simulation study on phosphorus load from non-point sources in Yangzonghai catchment based on SWAT Model [Dissertation]. Kunming: Yunnan University, 2012. [杨亮秀. 基于 SWAT 模型的阳宗海流域非点源磷负荷模拟研究[学位论文]. 昆明: 云南大学, 2012.]
- [30] Wang Jiangfei, Zhou Kejin, Wang Xiaoquan *et al.* Atmospheric nitrogen and phosphorous deposition in Hangjiahua area. *China Environmental Science*, 2015, **35**(9): 2754-2763. [王江飞, 周柯锦, 汪小泉等. 杭嘉湖地区大气氮、磷沉降特征研究. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2754-2763.]
- [31] Xie Yingxin, Zhang Shuli, Feng Wei *et al.* Review of atmospheric nitrogen deposition research. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(4): 897-904. [谢迎新, 张淑利, 冯伟等. 大气氮素沉降研究进展. 中国生态农业学报, 2010, **18**(4): 897-904.]
- [32] Jiao Feng, Qin Huiping, Qin Boqiang. Identification of major exogenous sources of TN and TP in Beili Lake. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2012, **40**(2): 148-155. [焦锋, 秦惠平, 秦伯强. 北里湖总氮、总磷主要输入外源辨识. 河海大学学报(自然科学版), 2012, **40**(2): 148-155.]
- [33] Jia Junyan, Zhang Ying, Cai Xiaobu *et al.* A dynamic changes of wet deposition of nitrogen in southeast Tibet: taking Linzhi experiment station as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(4): 1907-1913. [贾钧彦, 张颖, 蔡晓布等. 藏东南大气氮湿沉降动态变——以林芝观测点为例. 生态学报, 2009, **29**(4): 1907-1913.]
- [34] Shen Zhanying, Lu Bin, Chen Haibo *et al.* Effects of meteorology condition in precipitation on aerosol concentration in Zhengzhou. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2009, **32**(3): 55-58. [申占营, 陆斌, 陈海波等. 降水过程中气象条件对郑州市区气溶胶浓度的影响. 气象与环境科学, 2009, **32**(3): 55-58.]
- [35] Asman WAH, van Jaarsveld HA. A variable-resolution transport model applied for NH_x in Europe. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(3): 445-464.

- [36] Benitez-Nelson CR. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems. *Earth-Science Reviews*, 2000, **51**(1): 109-135.
- [37] Chen Jin, Lu Ping, Chen Zhongying *et al.* Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus at Daya Bay in Huizhou during spring and summer. *J Trop Oceanograph*, 2014, **33**(2): 109-114. [陈瑾, 卢平, 陈中颖等. 惠州大亚湾春夏季大气氮磷沉降的研究. 热带海洋学报, 2014, **33**(2): 109-114.]
- [38] Jin Xing, Lu Ya, Jing Shuqing *et al.* Research on amount of total phosphors entering into Fuxian Lake and Xingyun Lake through dry and wet deposition caused by surrounding phosphorus chemical factories. *Environ Sci Surv*, 2010, **29**(6): 39-42. [金星, 陆娅, 靳澍清等. 抚仙湖、星云湖周边磷化工对湖面大气干、湿沉降总磷入湖量影响的调查研究. 环境科学导刊, 2010, **29**(6): 39-42.]
- [39] Zhang Xiufeng. Atmospheric nitrogen wet deposition and its effects on wetland water environment of Shanghai area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(6): 1099-1102. [张修峰. 上海地区大气氮湿沉降及其对湿地水环境的影响. 应用生态学报, 2006, **17**(6): 1099-1102.]
- [40] Yang Longyuan, Qin Boqiang, Hu Weiping. The atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, **38**(2): 104-110. [杨龙元, 秦伯强, 胡维平等. 太湖大气氮、磷营养元素干湿沉降率研究. 海洋与湖沼, 2007, **38**(2): 104-110.]
- [41] Deng Junjun, Wang Tijian, Li Shu *et al.* Study on atmospheric nitrogen oxidant and deposition flux in suburban of Nanjing. *Scientia Meteorologica Sciences*, 2009, **29**(1): 25-30. [邓君俊, 王体健, 李树等. 南京郊区大气氮氧化物浓度和氮沉降通量的研究. 气象科学, 2009, **29**(1): 25-30.]
- [42] Zhai Shuijing, Yang Longyuan, Hu Weiping. Atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during optimal algal growth period in northern Lake Taihu. *Environmental Pollution & Control*, 2009, **31**(4): 5-10. [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. 环境污染与防治, 2009, **31**(4): 5-10.]
- [43] Yuan Ling, Zhou Xinbin, Gu Xirong *et al.* Variation in wet deposition of nitrogen from atmosphere in typical areas of Chongqing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(11): 6095-6101. [袁玲, 周鑫斌, 辜夕容等. 重庆典型地区大气湿沉降氮的时空变化. 生态学报, 2009, **29**(11): 6095-6101.]
- [44] Cui Jian, Zhou Jing, Yang Hao. Observations of the input for atmospheric wet-deposition of nitrogen and sulfur into Agro-ecosystem. *Ecology and Environment Sciences*, 2009, **18**(6): 2243-2248. [崔健, 周静, 杨浩. 农田生态系统大气氮、硫湿沉降通量的观测研究. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2243-2248.]
- [45] Fan Minling, Wang Xuemei, Wang Qian *et al.* Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus into the Hengmen of Pearl River Estuary. *J Trop Oceanograph*, 2010, **29**(1): 51-56. [樊敏玲, 王雪梅, 王茜等. 珠江口横门大气氮、磷干湿沉降的初步研究. 热带海洋学报, 2010, **29**(1): 51-56.]
- [46] Zhang Feng. Atmospheric sedimentation of nitrogen and phosphorus and the contribution to the regional nutrient cycle in Changle River Basin [Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. [张峰. 长乐江流域大气氮、磷沉降及其在区域营养物质循环中的贡献[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.]
- [47] Liu Aiping, Li Laisheng, Reng Xiuwen *et al.* Flux and composition characteristic of dry and wet deposition of nitrogen and phosphorus in Pearl River Delta. Kunming: Chinese Society of Environmental Science Academic Annual Meeting, 2013. [刘爱萍, 李来胜, 任秀文等. 珠三角地区大气氮磷干湿沉降通量及其组成特征. 昆明: 中国环境科学学会学术年会, 2013.]
- [48] Yang Changliang, Chen Jianzhong, He Bin *et al.* Origin analysis of overproof of total phosphorus and its environmental capacity in Yangzonghai Lake. *Environmental Science Survey*, 2008, **27**(1): 44-46. [杨常亮, 陈建中, 贺彬等. 阳宗海总磷环境容量与总磷超标的原因分析. 环境科学导刊, 2008, **27**(1): 44-46.]