

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.005

北里湖总氮、总磷主要输入外源辨识

焦 锋¹ 秦惠平² 秦伯强³

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215011 ;

2. 苏州市吴中区环境监测站, 江苏 苏州 215218 ; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要 : 为了确定影响杭州西湖的主要污染源, 以相对封闭的西湖北里湖为研究对象, 通过在沿湖路面设置采样点以及在湖中设置大气沉降采样点, 对路面及大气入湖的 N 和 P 进行监测、估算。结果表明 (a) 各月大气总沉降中 TN 及 TP 的输入变化趋势不明显, 但干沉降中 TN 及 TP 的输入却有着明显的春、夏差异。3—8 月北里湖 TN 输入量为 1 202.20 kg, TP 输入量为 15.02 kg。(b) 沿岸人行道路路面由草地及不透水路路面构成, 路面灰尘以细颗粒 ($d < 150 \mu\text{m}$) 物质为主, 可占总量的 79.12% ~ 90.04% ; 不同粒径级的灰尘中 TN 含量呈现以下规律: 细颗粒组 ($28 \mu\text{m} \leq d < 150 \mu\text{m}$) > 极细颗粒组 ($d < 28 \mu\text{m}$) > 粗颗粒组 ($d \geq 150 \mu\text{m}$), 但 TN 含量分布特征不明显。(c) 草地的 N 和 P 输出通过输出系数法估算, 不透水路面的 N 和 P 输出通过模拟路面灰尘的累积、冲刷进行估算, 得到 2010 年 3—8 月北里湖来自沿岸人行道的 TN 输入量为 60.13 kg, TP 输入量为 12.52 kg。分析结果表明, 大气沉降是北里湖 N 输入的主要外源, 同时也是湖水中 P 的相对重要的来源。

关键词 : N 污染 ; P 污染 ; 大气沉降 ; 路面灰尘 ; 污染物累积特征 ; 北里湖

中图分类号 : X524

文献标志码 : A

文章编号 : 1000-1980(2012)02-0148-08

Identification of major exogenous sources of TN and TP in Beili Lake

JIAO Feng¹, QIN Hui-ping², QIN Bo-qiang³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China ;

2. Environmental Monitoring Station of Wuzhong District, Suzhou 215218, China ;

3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract : In order to identify the main pollution sources of Xihu Lake, Beili Lake, which is relatively enclosed and part of Xihu Lake, was selected as a research focus. The amounts of N and P from the road and atmosphere in the lake were monitored and assessed by setting up road dust sampling sites on the lakeside road and atmospheric deposition sampling sites in the middle of the lake. The results show the following : (a) The monthly input variations of TN and TP in total atmospheric deposition were not significant. However, significant differences could be observed in the dry deposition between spring and summer. The TN and TP inputs into Beili Lake from March to August were 1 202.20 kg and 15.02 kg, respectively. (b) The lakeside pavement was made up of grassland and impervious road surface. The road dust mainly consisted of granules ($d < 150 \mu\text{m}$), accounting for 79.12% to 90.04% of the total amount of dust. The content of TN in different grades of dust decreased in the following order : fine granule material ($28 \mu\text{m} \leq d < 150 \mu\text{m}$), superfine granule material ($d < 28 \mu\text{m}$), and coarse-grained granule material ($d \geq 150 \mu\text{m}$). The distribution of TN content presented no significant features. (c) The N and P outputs from grassland were assessed by the export coefficient model, and the N and P outputs from the impervious road surface were assessed through simulation of build-up and wash-off processes on the impervious road surface. The TN and TP inputs into Beili Lake from the lakeside pavement from March to August in 2010 were 60.13 kg and 12.52 kg, respectively. The analysis results show that atmospheric deposition

收稿日期 : 2011-02-21

基金项目 : “十一·五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-002) ; 建设部项目(2W8-K9-31)

作者简介 : 焦锋(1966—), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士, 主要从事水环境管理研究. E-mail : jiaof200@163.com

was the main exogenous source of the N input and a comparatively important source of the P input into Beili Lake.

Key words : nitrogen pollution ; phosphorus pollution ; atmospheric deposition ; road dust ; build-up feature of pollutant ; Beili Lake

杭州西湖是著名的风景区 ,其中相对封闭的湖区当数北里湖。北里湖总面积约 0.35 km² ,其北至西北一线为葛岭 ,南部为孤山 ,东与西湖主体以白堤相隔(图 1)。近年西湖及北里湖的水环境问题不容乐观^[1-3] ,水质指标以 N 超标较为严重 ,水体透明度较差及富营养化问题也日趋严重 ,而确定 N 和 P 输入的主要外源成为水环境治理的一个关键问题。北里湖主要的 N 和 P 外源有湖面大气沉降、沿岸人行道路面物质入湖(北山路和白堤雨水由下水管网收集 ,不直接入湖)、孤山坡面冲刷物质以及湖内的荷叶枯落物腐烂释放的营养物质。笔者以湖面大气沉降、沿岸人行道路面入湖物质为研究对象 ,通过监测、取样探讨北里湖 N 和 P 的输入特征以及相对作用程度。

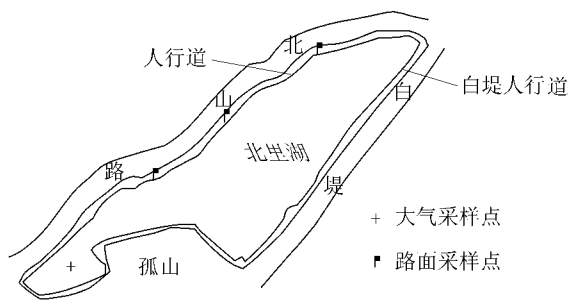


图 1 北里湖示意图

Fig. 1 Sketch map of Beili Lake

杭州市年平均降水量为 1 100 ~ 1 600 mm ,全年有 2 个雨季和 1 个多雨时段。第 1 个雨季自 5 月初前后开始 ,为主雨季 ,第 2 个雨季出现在 8—9 月 ;3—4 月为多雨时段 ,降雨量可占全年的 13% ~ 23%。其他月份降雨较少。考虑到春季和夏季是雨水较为集中的时段 ,大气总沉降量和路面物质冲刷入湖量也主要集中在这一时段 ,所以大气沉降和不透水路面样品采集工作从 2010 年 3 月展开 ,同年 8 月底结束。

1 监测采样方法

1.1 大气干、湿沉降采样方法

样品收集分为湿沉降收集和总沉降收集 ,参照翟水晶等^[4]的方法进行。由于北里湖面积相对较小 ,湖面的气象条件相对一致 ,因此仅在北里湖南部水面上设置 1 个总沉降采样点。采样架包括不锈钢支柱和 180 mm × 150 mm 不锈钢托盘 ,托盘放置离水面 1.5 m。托盘上放置直径 151 mm、高 200 mm 的有机玻璃采样罐 ,采集总沉降样品。总沉降样品每 10 d 取 1 次。同时 ,1 个湿沉降采样点设置在与总沉降采样点直线距离约 200 m 的西湖美术馆屋顶上 ,该屋顶高 7 m。干沉降样品中的 TN 和 TP 量由总沉降中 TN 和 TP 量减去湿沉降 TN 和 TP 量获得。所有样品均由中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖站实验室负责监测。

另外在西湖美术馆屋顶上设置翻斗式自记式雨量计、自记式温度计、风速仪 ,监测雨量、风速、温度等气象要素。

1.2 路面采样方法

路面监测从 2010 年 3 月 8 日开始 ,每月分月上中期、月底、旬期进行采样 ,各旬采 2 次样混合后作为该旬样品。采样点选择在湖边交通干道北山路旁的人行道路面上 ,每隔 300 m 设 1 个采样点 ,共设 3 个固定的采样点 ,分别采样后将 3 个点的样品混合作为该路面代表样品。每个采样点为面积 5 m × 1.5 m 的长方形地块。样品收集设备为改制的大功率吸尘器 ,以确保尽可能将路面灰尘收集齐全。收集后将杂物清理掉 ,风干、分粒级称重、测不同粒级灰尘中 N 和 P 的含量。TN 的测定采用半微量凯式法 ,TP 的测定采用钼锑抗分光光度法。

为研究路面不同时段灰尘的累积特点 ,分别于 6 月 21—23 日、7 月 31 日至 8 月 2 日以及 11 月 23—24 日 3 个时段进行采样。每个时段的采样之初先选择路面状况相对一致的路段 ,再在其中细分出相邻的地块 11 个 ,每个地块面积为 4 m × 1.5 m。用吸尘器吸干净这些地块路面的灰尘 ,然后每 3 h 在邻近的 1 个新地块上采样 ,每个时段共获得 11 个样品 ,从而构成灰尘的逐时累积过程。采样完成后将样品中的杂物清理去除 ,样品风干、分粒级并称重。

为确定无雨期对灰尘累积的影响 ,分别选取 3 个无雨时段 ,每个时段选择路面状况相对一致的路段 ,细分出 2 块 1.5 m × 1.5 m 的相邻地块 A 和 B ,累积开始时先对 A 地块采样 ,累积结束时对 B 地块采样 ,采样完成后将样品中的杂物清理去除 ,样品风干、称重 ,通过对比所获样品的累积量来分析无雨期前后路面灰尘累

积量是否增加。

另外,实地勘测人行道路面的草地面积和不透水路面积,测定仪器为GPS和手持激光测距仪。

2 大气干、湿沉降入湖量估算

通过大气沉降监测,获得各月干、湿沉降数据。干、湿沉降通量计算公式如下:

$$T = 1000CV/S$$

式中: T ——干、湿沉降通量, kg/km^2 ; V ——样品总体积, L ; C ——总沉降中 TN 和 TP 的质量浓度, mg/L ; S ——采样罐底面积, m^2 ; 1000——单位换算系数。

从图2可以看出,逐月总沉降中的 TN 变化幅度不大,最小值为 $334.68 \text{ kg}/\text{km}^2$,最大值为 $493.32 \text{ kg}/\text{km}^2$,变异系数为 0.12。干沉降中总氮的最小值 $71.78 \text{ kg}/\text{km}^2$,最大值 $271.92 \text{ kg}/\text{km}^2$,变异系数 0.45,干沉降的变动幅度远大于总沉降,且 TN 的干沉降量春季 3—5 月明显大于夏季 6—8 月;各月总沉降中 TP 的沉降通量变化趋势不明显,最小值为 $3.10 \text{ kg}/\text{km}^2$,最大值为 $7.19 \text{ kg}/\text{km}^2$,变异系数为 0.27。各月干沉降中 TP 的沉降通量最小值为 $0.02 \text{ kg}/\text{km}^2$,最大值为 $6.47 \text{ kg}/\text{km}^2$,变异系数为 0.80,同样表现为干沉降的 TP 变化幅度较大,且 TP 的干沉降量夏季 6—8 月远大于春季。从 N 和 P 的来源分析,由于大气中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的成分主要来自于农田或企业,因此统计各月沉降量中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在 TN 中所占的比重(平均值为 56.63%),结果表明农田可能是大气中 N 的重要来源之一。最后,用沉降通量乘以北里湖面积获得 3—8 月 TN 输入量为 $1\,202.20 \text{ kg}$, TP 输入量为 15.02 kg 。

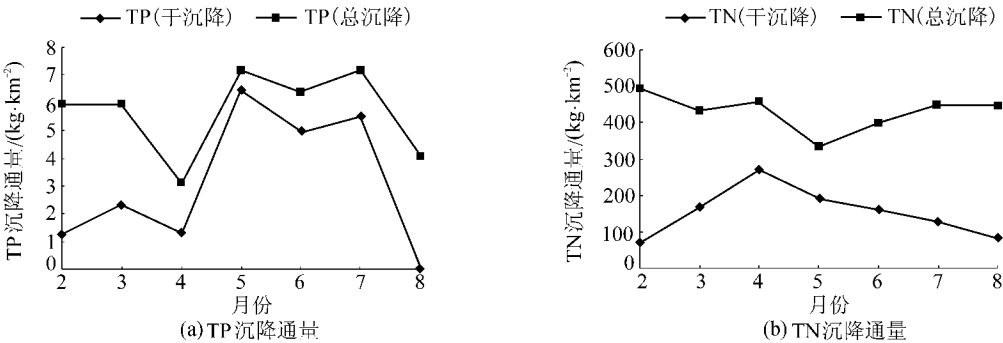


图2 2010年2—8月大气干沉降、总沉降中TN和TP的逐月输入量

Fig. 2 Monthly TN and TP inputs in dry and total depositions from February to August in 2010

3 沿湖人行道路面N和P入湖量分析

3.1 不透水路路面尘样粒级分布特征

在采样时段内,将所得样品通过50目、100目、300目、500目筛进行筛分,获得粒径 $d \geq 300 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m} \leq d < 300 \mu\text{m}$, $48 \mu\text{m} \leq d < 150 \mu\text{m}$, $28 \mu\text{m} \leq d < 48 \mu\text{m}$, $d < 28 \mu\text{m}$ 共5组粒级的物质并分别称重,以确定各粒级所占比例,结果见表1。从各粒级组所占的比例来看, $d < 48 \mu\text{m}$ 的较细物质(包括 $28 \mu\text{m} \leq d < 48 \mu\text{m}$ 和 $d < 28 \mu\text{m}$ 的2组物质)的质量分数占59%以上,最低的占59.61%(4月中旬),最高则达到80.07%(3月下旬); $d \geq 48 \mu\text{m}$ 的较粗物质(包括 $d \geq 300 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m} \leq d < 300 \mu\text{m}$, $48 \mu\text{m} \leq d < 150 \mu\text{m}$ 的3组物质)的质量分数最高可达59.32%(8月上旬),最低仅占19.91%(3月下旬)。参考已有的分组方法^[5]进行分组,将上述粒径组重新组合成下列3组:粗($d \geq 150 \mu\text{m}$)、细($28 \mu\text{m} \leq d < 150 \mu\text{m}$)和极细($d < 28 \mu\text{m}$)。结果细和极细物质($d < 150 \mu\text{m}$)的质量分数最高,可达到90.04%,最低也可达到79.12%(其中极细物质($d < 28 \mu\text{m}$)的质量分数平均可达到37.15%,最高可达到58%)。以上结果与张慧敏等^[6]在杭州市区不同功能区的平均采样结果相比($d < 150 \mu\text{m}$ 的物质质量分数为77.63%),北里湖沿岸路面沉降物中细颗粒物所占比例更高,说明该区域路面沉降物以细和极细物质为主。

3.2 不透水路路面各粒级尘样的N和P分布特征

按粗、细、极细对尘样进行分组,并测定各组TN和TP的质量分数,结果见表2。从表2可以看出,TN质量分数变化范围为0.08~9.23g/kg,各旬尘样TN质量分数平均值变化范围为0.39~8.21g/kg。从不同粒级

表 1 2010 年 3—8 月北里湖沿岸路面尘土粒径分布

时间	尘土中各粒径物质质量分数/%				
	$D \geq 300 \mu\text{m}$	$150 \mu\text{m} \leq d < 300 \mu\text{m}$	$48 \mu\text{m} \leq d < 150 \mu\text{m}$	$28 \mu\text{m} \leq d < 48 \mu\text{m}$	$d < 28 \mu\text{m}$
3 月中旬	8.72	9.66	12.31	28.63	40.68
3 月下旬	8.09	5.70	6.13	58.03	22.04
4 月上旬	7.41	13.41	15.33	22.09	41.76
4 月中旬	4.65	16.03	19.71	20.93	38.68
4 月下旬	5.27	6.00	11.15	19.49	58.09
5 月上旬	4.80	4.45	15.69	67.34	7.72
5 月中旬	4.12	5.80	10.42	35.12	44.54
5 月下旬	6.05	11.20	22.63	16.37	43.75
6 月上旬	11.17	11.38	13.01	14.95	49.49
6 月中旬	5.26	9.14	17.38	38.22	30.00
6 月下旬	6.66	8.20	12.97	14.65	57.51
7 月上旬	14.68	15.38	21.52	14.37	34.06
7 月中旬	7.19	10.15	15.94	14.27	52.45
7 月下旬	19.15	11.56	18.46	11.96	38.87
8 月上旬	29.96	12.83	16.53	10.21	30.46
8 月中旬	14.85	10.11	15.45	12.96	46.64

表 2 2010 年 3—8 月北里湖沿岸路面各粒级尘土中 TN 和 TP 的质量分数

Table 2 TP and TN contents for various granule grades of road dust around Beili Lake from March to August in 2010 g/kg								
时间	$u(\text{TN})$			$u(\text{TP})$			加权平均值	
	粗颗粒	细颗粒	极细颗粒	粗颗粒	细颗粒	极细颗粒	$u(\text{TN})$	$u(\text{TP})$
	$(d \geq 150 \mu\text{m})$	$(28 \mu\text{m} \leq d < 150 \mu\text{m})$	$(d < 28 \mu\text{m})$	$(d \geq 150 \mu\text{m})$	$(28 \mu\text{m} \leq d < 150 \mu\text{m})$	$(d < 28 \mu\text{m})$		
3 月中旬	3.35	4.22	3.70	1.12	1.35	1.38	3.85	1.32
3 月下旬	4.96	4.07	3.01	1.56	1.46	1.50	3.96	1.49
4 月上旬	6.98	9.23	7.91	1.76	1.99	1.86	8.21	1.88
4 月中旬	3.32	4.58	5.73	0.61	1.22	1.31	4.76	1.13
4 月下旬	3.37	6.48	1.45	1.56	0.89	1.59	3.21	1.38
5 月上旬	2.20	4.23	0.89	1.91	1.80	1.81	3.79	1.81
5 月中旬	3.55	3.56	1.76	1.46	1.05	1.31	2.75	1.21
5 月下旬	0.08	0.85	1.98	0.59	0.71	0.83	1.21	0.74
6 月上旬	0.32	0.53	1.22	0.61	0.72	1.02	0.82	0.85
6 月中旬	0.35	2.02	2.47	0.84	0.65	0.78	1.92	0.72
6 月下旬	0.39	0.93	0.12	0.71	0.48	0.52	0.39	0.54
7 月上旬	1.16	1.57	1.60	0.69	0.48	0.68	1.46	0.61
7 月中旬	1.97	2.49	2.79	0.57	1.05	0.70	2.56	0.78
7 月下旬	1.35	1.44	1.60	1.07	1.26	0.77	1.48	1.01
8 月上旬	1.53	2.63	1.77	1.23	1.01	0.94	1.80	1.08
8 月中旬	1.61	1.77	2.10	0.73	0.95	0.48	1.88	0.68
8 月下旬	1.82	2.12	1.93	0.56	0.51	0.58	1.96	0.55
总平均	2.25	3.10	2.47	1.04	1.03	1.06	2.71	1.05

组 TN 质量分数的平均值看,细颗粒组 > 极细颗粒组 > 粗颗粒组(其中前者明显高于后两者)。从前面的结论可知,该组所占比例最大,所以应是 N 的主要携带者。而 TP 的变化则不太明显,总体看来,各粒级组 TP 的质量分数基本相当,变化范围在 0.48 ~ 1.99 g/kg 之间,各粒级组的 TP 质量分数平均值变化范围为 1.03 ~ 1.06 g/kg,各旬 TP 质量分数的平均值变化范围为 0.54 ~ 1.88 g/kg。

路面尘样中 TN 和 TP 质量分数表现出一定的逐月变化特征,从每月上、中、下旬各粒级 TN 和 TP 质量分数的平均值来看,它们明显地随时间变化而降低。若以季节划分则这种变化趋势更加明显,春季 3—5 月明显较高,夏季 6—8 月相对较低。车辆和人流的变化不可能系统性地造成春季尘埃中 N 和 P 含量高于夏季的特点,大气沉降可能是导致这种季节差异的主要因素。前面关于大气干沉降分析中,春季干沉降中 TN 沉降量明显高于夏季也证明了这一点。春季施肥可能较大地影响了大气中的 N 含量,并最终影响路面灰尘的 N 含

量.另外春季路面尘样中混入植物花粉,也会导致尘样中的 N 和 P 含量同时升高.

3.3 路面灰尘累积影响因素分析

取样点位于交通密集区,目视观察可以发现,无论什么季节,每日 8 00 以前车流量不大,但 8 00 以后车流量迅速接近饱和,一直持续到 22 00 以后.车辆行驶是造成路面尘土的主要原因,其次就是大气沉降.影响路面灰尘沉积的因素主要有车流量、环卫工人的日常扫街、风力等因素^[7-9],本文所取样品是上述因素共同作用的结果.

3.3.1 清扫道路及行车流量对路面积尘的影响

在 2010 年 6 月 21—22 日以及 7 月 31 日至 8 月 1 日 2 个时段中,分别观察到 1 次清扫道路事件,清扫工具为笤帚,而 11 月 23—24 日的观察中则没有清扫道路事件,所观测到的路面尘土沉积量变化见图 3.6 月 21 日 6 00 清扫干净的路面,至 12 00 灰尘沉积量就急速增加至 0.92 g/m^2 ,15 00 时路面灰尘累积量达到最大值(0.93 g/m^2),其后开始减少,18 00 时灰尘累积量降至 0.52 g/m^2 .当日夜间未监测.22 日 6 00 之后灰尘沉积量在 $0.51\sim 0.73\text{ g/m}^2$ 之间变动.另一监测时段为 7 月 31 日至 8 月 1 日.7 月 31 日 6 00 路面清扫干净,15 00 监测到路面灰尘累积量达到相对高值,其后路面灰尘累积量也发生一定的波动,波动范围在 $0.41\sim 0.80\text{ g/m}^2$ 之间.车流量对路面灰尘的影响已得到很多研究的证实,但在上述 2 个时段中表现并不显著,在 2 次监测的后半时段,即 6 月 22 日和 8 月 1 日 6 00—9 00 时段,在路面灰尘未清扫的情况下,车流量剧增时路面灰尘累积量并未随车流量的增加而增加,反而有所减少,说明还有其他因素影响了路面灰尘的累积.实际上 Barrett 等^[10]也曾认为交通密度对灰尘累积的影响在小尺度路段上并不明显.

从表 3 可以看出道路清扫对路面灰尘累积的影响不明显,2 次清扫后灰尘累积量进一步增大,原因在于扫帚的清除效率不高,很多机械设备的清扫也只能对 $d > 250\text{ }\mu\text{m}$ 的尘粒产生显著的作用^[11-12].而北山路面监测的结果表明大部分灰尘粒径小于 $150\text{ }\mu\text{m}$,因此扫帚的作用可能很不明显.其次,扫帚清扫只能去除掉占灰尘量比例较少的那部分粗颗粒物,并可能通过摩擦生成更多的细颗粒物^[13].再者,清扫后灰尘还会继续累积,清扫的效果会被新的灰尘累积所削弱甚至抵消.

3.3.2 无雨期对灰尘累积量的影响

一般认为无雨期的长短对路面灰尘累积量有着明显的影响,但一些野外试验表明,路面灰尘累积量与采样前的无雨期长短并不直接相关^[14],即灰尘累积量并不会因累积期的增长而增加,灰尘累积过程可能受到其他因素的干扰,如人工清扫或风力影响而呈现出较复杂的变化.笔者分别在 2010 年 6 月 11—13 日、6 月 18—21 日以及 7 月 30 日至 8 月 1 日 3 个无雨时段进行相邻地块采样,采样前一天把 2 个地块 A 和 B 的路面灰尘清扫干净.观测结果表明这几个无雨期情况与道路灰尘累积量的无明显对应关系.

实际上,路面灰尘无雨期的累积量应是路面灰尘堆积与移除过程综合作用的结果,堆积作用来自于大气沉降、交通源排放,去除作用包括清扫事件、风力侵蚀,两者最终达成平衡^[15],但达成平衡所需的时间可能受采样点地表条件、气象条件、人为影响而出现较大差异,Eckley 等^[16]在未受干扰的遮雨条件下观测到长达 450 d 内灰尘累积仍未达到平衡的现象,但有些地点灰尘堆积平衡则可能在较短的时间内达成^[16].

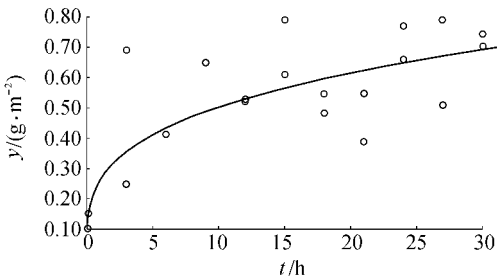


图 3 路面逐时沉积量的非线性函数回归
Fig. 3 Nonlinear regression of hourly build-up dust on road

表 3 观测时段北山路人行道路面灰尘累积量
Table 3 Build-up road dust on pavement of Beishan Road during observation period

观测时间	灰尘累积量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	观测时间	灰尘累积量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
2010-06-21T 09 00	0.69	2010-07-31T 09 00	0.25
2010-06-21T 12 00	0.92	2010-07-31T 12 00	0.41
2010-06-21T 15 00	0.93	2010-07-31T 15 00	0.65
2010-06-21T 18 00	0.52	2010-07-31T 18 00	0.53
2010-06-22T 06 00	0.61	2010-08-01T 06 00	0.79
2010-06-22T 09 00	0.48	2010-08-01T 09 00	0.55
2010-06-22T 12 00	0.55	2010-08-01T 12 00	0.39
2010-06-22T 15 00	0.66	2010-08-01T 15 00	0.77
2010-06-22T 18 00	0.51	2010-08-01T 18 00	0.79
2010-06-23T 06 00	0.70	2010-08-02T 06 00	0.74

3.3.3 风力作用路面灰尘沉积的影响

风力作用对路面灰尘沉积的影响有 2 个方面 (a) 风力携带的灰尘由于风速减小而发生沉积 (b) 风速较大时会造成路面灰尘重新浮起 , 导致一些细颗粒物质重新进入大气中^[17]。为了验证风力对灰尘累积的影响 , 挑选前期具有数日晴天的样品进行分析 , 从而避免样品累积过程受降雨因素的干扰。

用样品的累积量和取样前 3 d (包括取样当天) 的平均风速进行相关分析 , 结果(表 4)表明单位面积沉积量与风速有明显的逆对应关系 , 往往是风速较大时沉积在路面的物质质量相对较小 , 反之则较大 , 两者的变化趋势相反。风速与路面物质沉积量的相关系数为 - 0.62 , 反映了两者呈一定的负相关关系 , 说明风速对路面灰尘累积过程的影响较明显。

表 4 北里湖沿岸路面风速与路面灰尘累积量的关系

Table 4 Relationship between wind velocity and build-up road dust on lakeside road					
日期	路面灰尘累积量/(g·m ⁻²)	风速/(m·s ⁻¹)	日期	路面灰尘累积量/(g·m ⁻²)	风速/(m·s ⁻¹)
2010-03-29	0.82	1.55	2010-05-21	0.78	1.62
2010-04-09	0.68	3.17	2010-06-08	0.70	2.00
2010-04-17	0.75	2.66	2010-06-16	0.76	1.51
2010-05-04	0.83	2.10	2010-06-19	0.69	2.25
2010-05-12	0.70	2.54			

3.4 人行道路面灰尘累积平衡及数据拟合

国外研究表明 , 灰尘累积过程可以用线性关系、指数函数、幂函数、互反函数等进行模拟^[15,18-20] , 一般认为指数函数在形式上可以反映灰尘的累积机理。这些函数表明 , 在灰尘沉积初期 , 灰尘量会迅速增加 , 其后达到一个平衡值并在平衡值附近波动。从现有的资料和数据分析 , 北山路的这一平衡应是一个以小时计量的日内快平衡 , 原因如下 (a) 对 3—8 月共 23 个样品以单位面积灰尘量进行分段统计(表 5) , 出现频率最大的区间落在 0.60 ~

表 5 2010 年 3—8 月北里湖沿岸路面灰尘累积量统计

Table 5 Statistics of build-up road dust on lakeside road from March to August in 2010			
路面灰尘累积量/(g·m ⁻²)	出现频率/次	路面灰尘累积量/(g·m ⁻²)	出现频率/次
0.90 ~ 1.00	1	0.50 ~ 0.60	3
0.80 ~ 0.90	4	0.40 ~ 0.50	2
0.70 ~ 0.80	2	0.30 ~ 0.40	1
0.60 ~ 0.70	8	0.20 ~ 0.30	2

0.70 g/m² 的范围中。同时将 3—8 月所有尘样沉积量取平均值 , 得到均值为 0.63 g/m²。因此 , 0.60 ~ 0.70 g/m² 具有明确的统计意义 , 表明路面灰尘累积过程中的累积量经常地落在 0.60 ~ 0.70 g/m² 区间。(b) 从表 3 可知 , 0.60 ~ 0.70 g/m² 是路面灰尘累积的一个顶部震荡区间 , 可以认为这是一个平衡位置 , 达到平衡后的灰尘累积量将反复落在该区间 , 这就给出了 3—8 月很多灰尘累积量值会落在这个区间的解释。(c) 日内快平衡也解释了有些累积数据随无雨期的增加反而减少的现象 , 由于日内累积就可达成平衡 , 所以采样初始值可能就是较大值 , 其后由于风的吹扬 , 路面物质质量反而减少 , 因此在较长的时段中却看不出灰尘累积量在增加。

为模拟北山路路面春夏季的灰尘累积特点 , 以已有数据为基础 , 使用 SPSS 软件进行非线性函数回归分析 , 结果见图 3。

损失函数为残差平方和 , 参数估计方法为 Levenberg-Marquardt 方法 , 函数形式为幂函数 $y = at^b$, 其中 y 为单位面积灰尘累积量 , t 为小时数 , a 和 b 为待定参数。幂函数通过迭代计算获得最优参数 , 函数形式为 $y = 0.302t^{0.24}$, 反映回归优度的 $R^2 = 0.62$, 模型可以接受。线型描述的特征基本符合实际情况 , 本文采用该函数作为灰尘累积量的计算模型。

3.5 沿岸人行道不透水路面的 N 和 P 入湖量估算

不透水地面面积为 13 825 m² , 不透水地面的灰尘冲刷量采用城市暴雨径流管理模型 SWMM^[21] 中的冲刷模型 $W = C_1 q C_2 B$ 进行估算 , 其中 w 为灰尘冲刷量 , C_1 为冲刷系数 , q 为径流量 , C_2 为常数 , B 为路面积尘量。根据 Vanoni^[22] 的研究 , C_2 的取值区间为 1.10 ~ 2.60 , 最常出现值为 2 , 本研究取 2。Jorge 等^[23] 研究了 C_1 的取值范围 , 认为 C_1 可取 20 或 40 (对于商业区和居民区高不透水的路面取 40 , 对于含一定比例透水性路面的居民区则取 20)。北里湖沿岸人行道路面上的不透水路路面与草地各占约 50% , 因此理论上似应取 20 为宜 , 但笔者以极端输出情况考虑 , C_1 取 40。径流采用径流系数法进行折算 , 通过室内构建类似的人行道路面进行

降雨径流试验,结果表明:16次试验获得的径流系数为0.49~0.69,折中取0.60,3—8月雨量数据来自于自计式雨量计。灰尘累积规律采用函数 $y = 0.302t^{0.24}$ 进行估算。上述函数可模拟整个灰尘的累积和冲刷过程。

各月的N和P入湖量通过下式计算:

$$M = Wm$$

式中: M ——入湖的氮磷冲刷量; W ——路面灰尘累积量; m ——路面物质中的N和P质量分数。

计算时段为2010年3—8月,该时段是水生植物的主要生长期。通过编程进行连续模拟,整个北里湖沿岸的人行道3—8月由于降雨冲刷造成的TN入湖量约为9.21 kg,TP入湖量相对较少,约为4.41 kg。

4 北里湖N和P来源分析

4.1 沿岸人行道及草地N和P入湖量

北里湖沿岸人行道路面由白堤近湖侧人行道和北山路近湖侧人行道组成(不含北山路路面及白堤主干道路面),人行道路面包括路面砖铺成的不透水地面和人工草地2种类型,实测草地面积为16489 m²。草地表面的N和P输出采用年输出系数方法进行估算。对于不同土地类型的输出系数,国内外已有很多研究,但国内能引用的权威数据不多,国外自Rast等^[24]发表有关输出系数的文章以来,又陆续有涉及不同地区、不同年份的各土地类型输出系数的文章发表^[25-28]。笔者对比综合草地类型的输出系数,并参考EPA给出的N和P输出系数,得到草地总磷输出系数的最大范围为0.05~4.90 kg/(hm²·a),总氮的最大变幅为0.60~30.85 kg/(hm²·a)。使用输出系数最大值进行源于路面草地的N和P入湖量估算,TN输出系数取30.85 kg/(hm²·a)总磷输出系数取4.90 kg/(hm²·a),计算得到北里湖沿岸人行道及草地TN输入量为50.90 kg/a,TP输入量为8.09 kg/a。

4.2 大气沉降与人行道输入的N、P量对比

监测得到2010年3—8月北里湖大气总沉降中TN输入量为1202.20 kg,TP输入量为15.02 kg,通过加和得到同期北里湖沿岸来自人行道路(含不透水路路面及草地)的TN入湖量为60.10 kg,TP入湖量为12.50 kg。与大气沉降相比,来自人行道的TN输入量可以忽略,但来自两者的TP输入相当,不能随便忽略,因此认为来自大气沉降的TN是北里湖N的主要输入外源。就P而言,大气沉降和人行道路面输入的贡献相当。从目前西湖及北里湖水质现状来看,N超标是主要问题,但欲削减来自大气沉降中的N则比较困难。因此,在未来的北里湖调水及换水工程中,应重点考虑大气沉降输入的N影响,通过稀释来降低水体中TN质量浓度。

5 结 论

a. 2010年3—8月北里湖大气总沉降中TN输入量可达1202.20 kg,TP输入量为15.02 kg,两者输入的逐月变化不明显。

b. 北里湖沿岸人行道路面以灰尘颗粒以较细($28\mu\text{m} \leq d < 150\mu\text{m}$)和极细($d < 28\mu\text{m}$)的为主。

c. 不同粒级组灰尘颗粒的TN含量呈现:细颗粒组>极细颗粒组>粗颗粒组;其中细颗粒组N含量明显高于其他两组,但各粒级组的P含量基本相当。

d. 路面尘土累积在多因素共同作用下存在日内平衡状况,平衡区间为0.60~0.70 g/m²,拟合累积规律可用公式 $y = 0.302t^{0.24}$ 模拟。

e. 从外源输入来看,北里湖沿岸人行道对湖体输入的TN相对于大气干湿沉降输入而言,可以忽略,但TP输入不可简单忽略。

参考文献:

- [1] 张志兵,施心路,刘桂杰,等.杭州西湖浮游藻类变化规律与水质的关系[J].生态学报,2009,29(6):2980-2988.(ZHANG Zhi-bin,SHI Xin-lu,LIU Gui-jie,et al. The relationship between plank tonic algae changes and the water quality of the West Lake, Hangzhou, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6):2980-2988.(in Chinese))
- [2] 项斯端,吴文卫,黄三红,等.近2000年来杭州西湖藻类种群的演替与富营养化的发展过程[J].湖泊科学,2000,12(3):219-225.(XIANG Si-duan,WU Wen-wei,HUANG San-hong,et al. Algae species succession and trophic developing process during the past 2000 years in the West Lake Hangzhou[J]. Journal of Lake Sciences, 2000, 12(3):219-225.(in Chinese))
- [3] 韩曾萃,朱军政,江影,等.杭州西湖总磷模型及其治理应用(I)[J].环境污染与防治,2005,27(2):139-141.(HAN Zeng-cui,ZHU Jun-zheng,JIANG Ying,et al. The model of total phosphorus in West Lake Hangzhou and its application(I)[J]. Environmental Pollution and Control, 2005, 27(2):139-141.)

- cui ZHU Jun-zheng ,JIANG Ying ,et al. Then TP model of West Lake in Hangzhou and its application for management(I) [J]. The Environmental Pollution & Control 2005 ,27(2) :139-141.(in Chinese))
- [4] 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 ,31(4) :5-10.(ZHAI Shui-jing ,YANG Long-yuan ,HU Wei-ping Atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during optimal algal growth period in northern Lake Taihu [J]. Environmental Pollution And Control 2009 ,31(4) :5-10.(in Chinese))
- [5] 朱 航 ,王学良 ,陈玉成.重庆市主城区街道灰尘中氮、磷污染研究 [J]. 环境化学 ,2009 ,28(2) :306-307.(ZHU Min-hang ,WANG Xue-liang ,CHEN Yu-cheng. The research on pollution of N and P in the road dusts on the surface of streets of down town ,ChongQing [J]. Environmental Chemistry 2009 ,28(2) :306-307.(in Chinese))
- [6] 张慧敏 ,章明奎.杭州不同功能区道路灰尘中污染物的分布和有效性 [J]. 广东微量元素科学 ,2007 ,14(12) :14-18.(ZHANG Hui-min ,ZHANG Ming-kui. The concentration and availability of pollutants in road dust from different functional zones of Hangzhou City [J]. The Trace Elements Science of Guangdong 2007 ,14(12) :14-18.(in Chinese))
- [7] CHARLES W S ,EVERETT M ,MCCARTHY R ,et al. A comparative study of heavy 22 metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area :Birmingham and Coventry ,West Midlands ,UK [J]. Environment International 2003 ,29 :563-573.
- [8] VERMETTE S J ,IRVINE K N ,DRAKE J J. Temporal variability of the elemental composition in urban street dust [J]. Environmental Monitoring and Assessment ,1991 ,18 :67-77.
- [9] ZANDERS J M. Road sediment-characterization and implications for the performance of vegetated strips for treating road run off [J]. Science of the Total Environment 2005 ,339 :41-47.
- [10] BARRETT M E ,ZUBER R D ,COLLINS E R ,et al. A review and evaluation of the literature pertaining to the quality and control of pollution from highway runoff and construction , report No. CRWR 239 [R]. Austin ,TX ,USA :The University of Texas at Austin ,1993.
- [11] ELLIS J B ,REVITT D M. Incidence of heavy metals in street surface sediments :solubility and grain size studies [J]. Water , Air , and Soil Pollution ,1982 ,17 :87-100.
- [12] SARTOR J D ,BOYD G B. Water pollution aspects of street surface contaminants , report No. EPA-R2-72/08 [R]. Washington D. C. :US Environmental Protection Agency ,1972.
- [13] VAZE J ,FRANCIS H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface [J]. Urban Water 2002 ,4 :379-389.
- [14] CHRIS S E ,BRIAN B. Simulated rain events on an urban roadway to understand the dynamics of mercury mobilization in storm water runoff [J]. Water Research 2009 ,43 :3635-3646.
- [15] BALL J E ,JENKS R ,AUBOURG D. An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces [J]. The Science of the Total Environment ,1998 ,209 :243-254.
- [16] CHRIS S E ,BRIAN B ,MIRIAM D ,et al. Atmospheric mercury accumulation and wash off processes on impervious urban surfaces [J]. Atmospheric Environment 2008 ,42 :7429-7438.
- [17] 常静 ,刘敏 ,李先华 ,等.上海城市地表灰尘重金属污染累积过程与影响因素 [J]. 环境科学 ,2008 ,29(12) :3483-3487.(CHANG Jing ,LIU Min ,LI Xian-hua ,et al. Heavy metal mass accumulation of urban surface dust in Shanghai City [J]. Environment Science 2008 ,29(12) :3483-3487.(in Chinese))
- [18] KIM L H ,ZOH K D ,JEONG S M ,et al. Estimating pollutant mass accumulation on highways during dry periods [J]. Journal of Environmental Engineering ,2006 ,132(9) :985-993.
- [19] RICHARDSON C P ,TRIPP G A. Investigation of boundary shear stress and pollutant detachment from impervious surface during simulated urban storm runoff [J]. Journal of Environmental Engineering ,ASCE 2006 ,132 :85-92.
- [20] YUANA Y ,HALL K ,Oldham C. A preliminary model for predicting heavy metal contaminant loading from an urban catchment [J]. Science of the Total Environment 2001 ,266 :299-307.
- [21] HUBER W C ,DICKINSON R E. Storm water management model-version 4 ,user 's manual , report No. EPA/600/3-88/001a [R]. Athens ,Ga ,USA :US Environmental Research Laboratory ,1988.
- [22] VANONI V A. Sedimentation engineering [R]. ASCE Manual and Report on Engineering Practice. No. 54 ,New York :NY ,1975.
- [23] JORGE G ,LARRY A ,JENNIFER D ,et al. Storm water management model applications manual , report No. EPA/600/R-09/07 [R]. Washington , D. C. :US Environmental Protection Agency 2009.
- [24] RAST W ,LEE G F. Nutrient loading estimates for lakes [J]. Journal of Environmental Engineering ,1983 ,109(2) :502-517.
- [25] CLESCERI N L ,CURRAN S J ,SEDLAK R I. Nutrient loads to Wisconsin Lakes ,part I . nitrogen and phosphorus export coefficients [J]. Water Resources Bulletin ,1986 ,22(6) :983-989.
- [26] DODD R C ,MCMAHON G ,STICHTER S. Watershed planning in the Albemarle-Pamlico estuarine system :Report 1-annual average nutrient budgets [R]. Washington ,D. C. :US Environmental Protection Agency ,Center for Environmental Analysis ,1992.
- [27] LOEHR R C ,RYDING S O ,SONZOGI W C. Estimating the nutrient load to a water body [C]//RYDING S O ,RAST W. The Control of Eutrophication of Lake and Reservoirs ,Volume I :Man and Biosphere Series. New York :Parthenon Publishing Group ,1989 :115-146.
- [28] MCFARLAND A M ,HAUCK L M. Determining nutrient export coefficients and source loading uncertainty using in stream monitoring data [J]. Journal of American Water Resource Association ,2001 ,37(1) :223-236.