

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0904

耿頔, 杨芬, 韦朝阳, 等. 2015. 风浪扰动对太湖水体中砷在水相-悬浮物相之间分配的影响[J]. 环境科学学报, 35(5): 1358-1365

Geng D, Yang F, Wei C Y, et al. 2015. Effects of wind-wave disturbance on the partition of arsenic between the water-suspended solids phase of Lake Taihu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(5): 1358-1365

风浪扰动对太湖水体中砷在水相-悬浮物相之间分配的影响

耿頔^{1,2}, 杨芬^{1,3}, 韦朝阳^{1,*}, 季宏兵²

1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

3. 中国科学院大学, 北京 100049

收稿日期: 2014-08-02

修回日期: 2014-09-06

录用日期: 2014-09-06

摘要: 在太湖冬季不同风速下(0.8、1.8、2.7、3.2、4.0 m·s⁻¹)采集了不同深度(水深0.1、1.0和1.8 m,分别记为上、中和下层)的水样,测定了水体和悬浮物中的砷含量及水质参数,计算了砷在两相之间的分配系数,以期了解在太湖生物活动最低的阶段,风浪扰动作用对砷在水相和悬浮物相之间分配的影响.结果显示,随着风浪作用的加强,水体总砷含量有所增加,相应的悬浮物总砷含量及砷的分配系数降低,说明风浪作用可以降低悬浮物吸附砷的能力,以至于促进砷从悬浮物中的释放,进而使水体中的溶解态砷增加.相关性分析及变化趋势比较分析发现,砷分配系数的降低与在风浪扰动的影响下悬浮物浓度和溶解氧的增加,以及叶绿素 a 浓度的下降有关.不同风速下各参数的垂向分布变化显示,风浪扰动对中下层的砷分配系数以及中层的悬浮物砷含量影响较大;风速变大时,中层溶解态砷含量升高,上层与下层溶解态砷含量降低;而风浪扰动作用对水体总砷的分层变化影响不大.悬浮物浓度、砷浓度及分配系数均在 3~4 m·s⁻¹ 风速下发生变化,且呈现与之前不同的分层特征. 4 m·s⁻¹ 可能是一个临界风速,在 4 m·s⁻¹ 以上的风速下风浪占主导作用,而 4 m·s⁻¹ 以下是湖流与风浪共同作用的结果.

关键词: 风浪扰动; 悬浮物; 砷; 分配系数

文章编号: 0253-2468(2015)05-1358-08

中图分类号: X524

文献标识码: A

Effects of wind-wave disturbance on the partition of arsenic between the water-suspended solids phase of Lake Taihu

GENG Di^{1,2}, YANG Fen^{1,3}, WEI Chaoyang^{1,*}, JI Hongbing²

1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2. Civil & Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Received 2 August 2014;

received in revised form 6 September 2014;

accepted 6 September 2014

Abstract: Water samples were collected at a site in Lake Taihu in January 2014 at the depth of 0.1 m, 1.0 m and 1.8 m, representing the surface, middle and bottom layer, respectively, with wind speeds of 0.8, 1.8, 2.7, 3.2 m·s⁻¹ and 4.0 m·s⁻¹. The water quality parameters and arsenic contents in water and suspended solids were determined and the partition coefficients of arsenic in two phases were obtained to understand the effects of wind-wave disturbance on the partition of arsenic between the water and suspended solids phase at the lowest stage of the biological activity of Lake Taihu. The results showed increased dissolved arsenic and decreased arsenic in suspended solids and partition coefficients with the increase of wind speeds, indicating that wind wave reduced the particle adsorption ability of arsenic, thereby promoting the release of arsenic from particulate matter and increasing the dissolved arsenic in water body. Correlation analysis suggested that the reduction of partition coefficient of arsenic was related with increased suspended solids contents and dissolved oxygen and decreased chlorophyll-a contents under the influence of wind wave disturbance. In the vertical profile of the sampling site, wind-wave disturbance had greater impact on the partition coefficient in the middle and bottom layer water and arsenic in suspended solids in middle layer water, as compared to the other one and two corresponding layers, respectively. The dissolved arsenic content increased in middle layer water and

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41271447)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41271447)

作者简介: 耿頔(1990—),女,E-mail:gengdi0181@163.com; * 通讯作者(责任作者),E-mail:weicy@igsnr.ac.cn

Biography: GENG Di (1990—), female, E-mail:gengdi0181@163.com; * **Corresponding author**, E-mail:weicy@igsnr.ac.cn

decreased in surface and bottom layer water, when the wind speed increased, while wind-wave disturbance did not affect the stratification of total arsenic. Suspended solids and arsenic content, as well as the partition coefficient differed in stratification characteristics, mostly in $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wind speed. The value of $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ may probably be a critical wind speed, with greater wind speeds playing dominant role on wind-wave disturbance while lower wind speed affecting the wind-wave disturbance together with lake flow function.

Keywords: wind-wave disturbance; suspended solids; arsenic; partition coefficient

1 引言(Introduction)

近年来,我国各大江河、湖库普遍受到不同程度的重金属污染,鄱阳湖、太湖、巢湖、洪泽湖、阳宗海、滇池、湘江流域、黄浦江、环太湖主要河流、大沙河等地表水受 Pb、Cd、Hg、As、Cr 污染较重,砷污染更成为普遍现象(金雪莲等, 2012).湖泊由水相、沉积物、生物相构成,三者不可分割.砷在三相中的迁移转化是一个动态过程,涉及物理、化学、生物变化及人类的干扰活动(顾丁锡和黄漪平, 1981).重金属在水环境中的迁移、赋存主要以颗粒态的形式进行,水中悬浮物含量决定着整个水体中的重金属含量(Zhu *et al.*, 2005).砷酸盐和亚砷酸盐大多被颗粒物吸收,像这样含砷的颗粒很容易受到风浪作用的影响(Linge and Oldham, 2002).风浪是由于风作用于湖面所产生的一种水质点周期性起伏运动.风浪所引起湖水的垂直紊动,对湖水理化性质的分布、湖中泥沙的输移、浮游生物的迁移及湖水中污染物质的扩散和净化等过程均有一定的影响(王苏民和窦鸿身, 1998).目前,国内对于浅水湖泊中风浪作用对水体重金属的研究主要集中在水体悬浮物重金属的含量(池俏俏等, 2006)、胶体态痕量重金属的含量(张战平等, 2006)及重金属的形态(池俏俏等, 2007)等.而对于浅水湖泊中风浪扰动下砷在水相和悬浮物相的分布规律,目前还没有相关的研究报道.风浪扰动作用会改变重金属在水-颗粒的分配平衡,使原本吸附或结合于颗粒物中的重金属得到释放进入水体,进而提高重金属的生物可利用性及生物毒害作用(俞慎和历红波, 2010).研究风浪扰动作用对砷分配的影响可以为降低浅水湖泊中砷的生态危害提供理论基础.太湖位于长江下游三角洲上,面积为 2338 km^2 ,平均深度 1.89 m ,最大水深不超过 3 m ,是一个大型浅水湖泊(秦伯强等, 2003a).风浪扰动和生物扰动都会引起沉积物的再悬浮和重金属的释放(俞慎和历红波, 2010).本研究选择太湖进行研究.为降低生物作用的可能影响,实验在太湖 1 年中最冷的月份进行.期间对太湖小风浪过程中水体及悬浮物中的砷含量及水质参数

的变化进行了观测和分析,进而查明太湖风浪扰动作用对砷在水相和悬浮物相之间分配的影响.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 样品的采集

本次观测于 2014 年 1 月 11—16 日进行,也是太湖一年最冷的月份.观测地点位于太湖梅梁湾口东岸处(中国科学院太湖湖泊生态系统研究站栈桥平台附近),即 $31^{\circ}24'1''\text{N}$, $120^{\circ}12'3''\text{E}$ (图 1).观测点距岸边约 100 m ,水深 1.845 m ,湖底软泥的厚度约 20 cm ,软泥下面为硬土和岩石(朱广伟等, 2004).分别在不同风速下(0.8 、 1.8 、 2.7 、 3.2 、 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)进行采样.采样时用采水器采集上层水(水下 0.1 m)、中层水(水下 1.0 m)、下层水(水下 1.8 m),分别收集 500 mL 于聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)水样瓶中,用于砷含量等参数的测定.采样后 2 h 内带回实验室进行处理.每次取 2 个平行样.采样的同时用 AQUAREAD 多参数水质分析仪(英国)测上中下 3 个水层的水质参数.

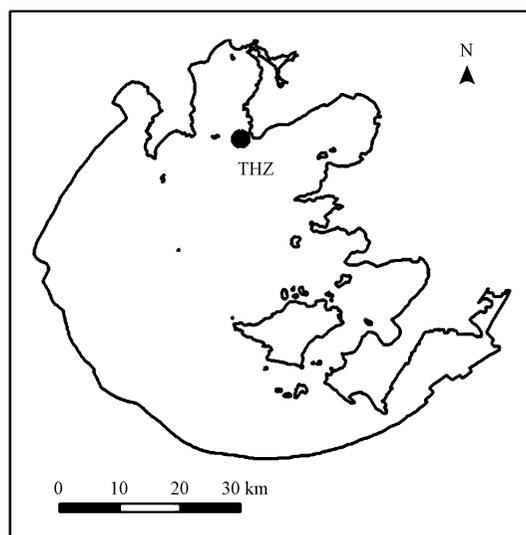


图 1 采样点位置图

Fig.1 Location of sampling site

2.2 样品的处理及测定

采集的其中 500 mL 水样一部分直接装入 80 mL 采样瓶,用于原水总砷的测定;留取 50 mL 原水

水样用于测定原水的总氮总磷;一部分水样(150 mL)用醋酸纤维滤膜过滤,将过滤的水样一部分装入 80 mL 采样瓶中用于测定过滤水的总磷(溶解态磷);留取 10 mL 过滤水样用于测定溶解态总氮总磷.第 1 次过滤的膜用锡纸包起来,装进自封袋冷冻干燥,称重测定悬浮物浓度(SS),将滤膜用硝酸-高氯酸消解,消解上清液测定悬浮物总磷;留取第 2 次过滤的膜用于叶绿素 a 的测定.总氮总磷采用高压-过硫酸钾消解法测定(Valderrama, 1981).叶绿素 a 采用丙酮萃取分光光度法测定(杨玉珍等, 2011).利用氢化物发生-原子荧光光谱仪(北京吉天)测定样品中的砷(郭莉霞等, 2005).

2.3 分配系数的计算

污染物质在悬浮物-水体间的分配系数指在水-悬浮物两相体系达平衡状态时,污染物在悬浮物和水中的浓度的比值(李国莲等, 2011).分配系数的计算公式如下:

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} \quad (1)$$

表 1 观测取样时的气象条件参数及其描述性特征

Table 1 Meteorological conditions and parameters at the sampling site

观测序号	观测日期	温度/℃	气压/hPa	风速概况	风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	风向	风浪概况
1	2014.1.11	4	1032	2 级轻风	3.2	东南	有明显风浪
2	2014.1.12	5	1033	1 级软风	0.8	西北	基本没有风浪
3	2014.1.13	3	1035	2 级轻风	2.7	东北	有风浪
4	2014.1.15	3	1037	2 级轻风	1.8	东北	有小风浪
5	2014.1.16	6	1030	3 级微风	4	东南	有明显风浪

3.1.2 水质参数 在不同风速下分层测定水质参数(表 2),从表中可以看出,不同水深处的 pH 随着风速的增加而增大,而且在下层 pH 比上层和中层有明显的下降.溶解氧(DO)会随着水深的增加而略有增加,在上层到中层增加的幅度较大,中层到下

式中, C_s 、 C_w 分别为体系达平衡状态时固相($mg \cdot kg^{-1}$)和液相($mg \cdot L^{-1}$)中重金属的含量和浓度.

2.4 质量控制

测定悬浮物砷的分析过程中,加入模拟天然水标准(GBW(E)080390)、空白样和 100% 平行样进行分析质量控制,标准水样分析回收率为 101% ~ 110%,平行样相对偏差低于 10%.

3 结果(Results)

3.1 环境因素

3.1.1 气象条件 采样期间观测点的气象概况见表 1.气温在 3~6℃ 之间,稍高于 1 月平均最低温度(1.87℃).风速在 1~3 级之间,属于小风速,观察湖面风浪是从无风浪到明显风浪.西风、西南风及南风的情况下,风浪对该湖区的扰动作用强烈,与梅梁湾口一带的敞水区的水动力强度相当;而东北风时,由于受近岸山体的影响,观测点的水动力扰动强度要弱于湖中(朱广伟等, 2005).

层增加的幅度较小,上层受风浪影响较大,且随着风速的增加有上升的趋势.电导率(EC)、氧化还原电位(ORP)和氮磷(TN、TDN、TP、TDP)受风浪影响不明显,叶绿素 a(Chl-a)的浓度随着风速的增加有降低的趋势,在 $4 m \cdot s^{-1}$ 时有大幅度的减少.

表 2 各观测采样对应的水质参数

Table 2 Water quality parameters corresponding to various samples

观测序号	样品编号	分层	风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	pH	ORP/ mV	DO/ ($mg \cdot L^{-1}$)	EC/ ($\mu S \cdot m^{-1}$)	TN/ ($mg \cdot L^{-1}$)	TDN/ ($mg \cdot L^{-1}$)	TP/ ($mg \cdot L^{-1}$)	TDP/ ($mg \cdot L^{-1}$)	Chl-a/ ($\mu g \cdot L^{-1}$)
2	THZ1	上	0.8	8.90	141.9	12.82	468	2.523	2.502	0.052	0.026	11.792
2	THZ2	中	0.8	8.89	141.1	13.33	483	2.584	2.351	0.053	0.022	10.779
2	THZ3	下	0.8	8.81	141.0	13.42	486	2.547	2.362	0.058	0.025	12.276
4	THZ4	上	1.8	8.92	134.4	14.46	497	2.295	2.171	0.045	0.020	7.738
4	THZ5	中	1.8	8.93	135.1	14.64	479	2.354	2.162	0.046	0.017	8.463
4	THZ6	下	1.8	8.87	135.2	14.77	482	2.356	2.146	0.052	0.017	9.514

续表2

观测 序号	样品 编号	分层	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	pH	ORP/ mV	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TDN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TDP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Chl-a/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
3	THZ7	上	2.7	9.06	146.3	14.19	457	2.458	2.206	0.053	0.027	9.700
3	THZ8	中	2.7	9.01	144.8	14.47	462	2.452	2.235	0.055	0.026	9.337
3	THZ9	下	2.7	8.93	144.4	14.60	462	2.419	2.280	0.053	0.023	9.914
1	THZ10	上	3.2	9.08	199.5	13.30	422	2.441	2.135	0.059	0.022	8.977
1	THZ11	中	3.2	9.03	196.9	13.73	445	2.373	2.147	0.053	0.019	10.630
1	THZ12	下	3.2	8.97	196.4	13.84	455	2.483	2.233	0.068	0.023	10.844
5	THZ13	上	4.0	9.27	156.0	13.31	474	2.153	1.982	0.051	0.021	5.999
5	THZ14	中	4.0	9.15	154.1	13.64	485	2.243	1.879	0.058	0.022	4.771
5	THZ15	下	4.0	8.98	152.1	13.81	492	2.167	1.858	0.053	0.018	4.910

SS 在水体中的垂向分布见图 2. 0.8、1.8、2.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下上中下层水体中 SS 总量的平均值见图 3. 上层的悬浮物浓度随风速的增加而先降低后增

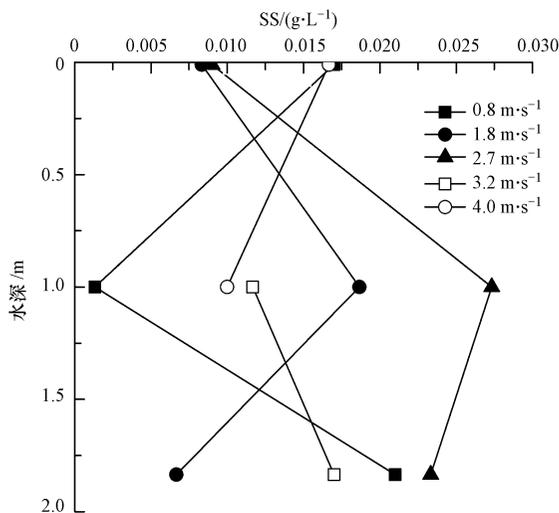
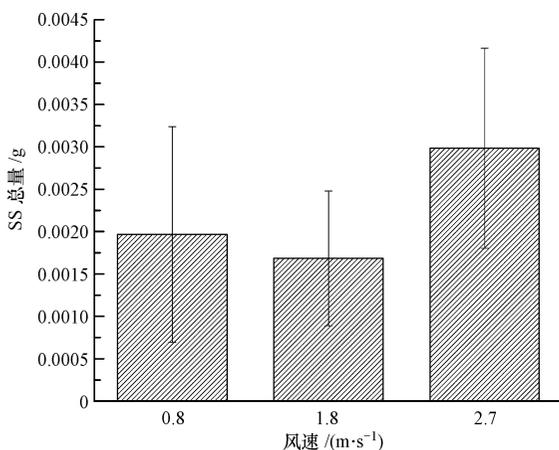


图 2 不同风速下悬浮物 (SS) 的垂向分布图

Fig.2 Vertical distribution of SS under different wind speeds

图 3 不同风速下水柱悬浮物 (SS) 总量 (均值±标准差, $n=6$)Fig.3 Average values of the SS in the profile under different wind speeds (mean±SD, $n=6$)

大;中层则是随风速的增加先增大后降低;下层由于缺少数据,波动比较大,规律性不强(图 2).由于 3.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 4.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的部分数据空缺,无法看出 SS 总量的变化规律.仅从现存数据来看,SS 是随着风速的增加而增加的(图 3).

3.2 风浪作用下的砷含量分布

上、中、下层水样测定的结果计算平均值列于表 3.溶解态砷浓度的变化比较小,最高值出现在 2.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时.随着风速的增加,原水砷浓度有升高的趋势,除了 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时浓度较低.风浪作用可以使水体总砷增加 1.5 倍左右.悬浮物砷浓度有降低的趋势,4.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时为 0.8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的 1/3 左右.分配系数变化不大,在风浪扰动的作用下略有降低.

表 3 不同风速下太湖水体砷含量及分配系数的平均值

Table 3 Average arsenic contents and partition coefficient under different wind speeds

风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	溶解态砷/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	总砷/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	悬浮物砷/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	$\log K_d$
0.8	0.529	0.679	29.72	4.682
1.8	0.553	0.845	16.27	4.516
2.7	0.656	0.719	29.578	4.284
3.2	0.492	0.993	20.068	4.481
4.0	0.458	0.479	10.552	4.264

溶解态砷、总砷、悬浮物砷、分配系数及 SS 之间的相关系数见表 4.从表中可以看出,悬浮物砷和分配系数呈显著正相关,而悬浮物砷、分配系数和 SS 均呈显著负相关.

图 4 显示了不同风速下不同深度水体的砷含量及分配系数垂向变化.从图 4a 可以看出,0.8、1.8 和 2.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 3 个较低风速下,溶解态砷在表层和下层的含量较高,最大为 0.9 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,中层含量较低,稍高于 0.3 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;而在 3.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 4.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 两个较

高速下,溶解态砷分层分布呈完全相反的特征,上层和表层较低,在 $0.3\sim 0.4\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,而中层较高,接近 $0.8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.表层水在 $0.8\sim 2.7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速变化范围内砷含量变化不明显,但当风速增加到 $3.2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,砷含量明显下降.底层水砷含量变化与表层水相似,随着风速的增加而先增加后降低的,而转折点仍然是在 $3.2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.中层水的变化趋势与表层和底层水相反, $0.8\sim 2.7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速时,砷含量几乎不变, $3.2\sim 4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,砷含量上升.虽然不同水层变化趋势不同,但是变化范围大致相同,砷浓度变

化均在 $0.3\sim 0.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围.

表 4 砷含量及分配系数和 SS 的相关系数

Table 4 Correlation of arsenic contents, partition coefficient and SS

	溶解态砷	总砷	悬浮物砷	分配系数	SS
溶解态砷	1	0.147	0.418	-0.01	-0.308
总砷		1	0.045	0.267	-0.298
悬浮物砷			1	0.767**	-0.623*
分配系数				1	-0.744**
SS					1

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

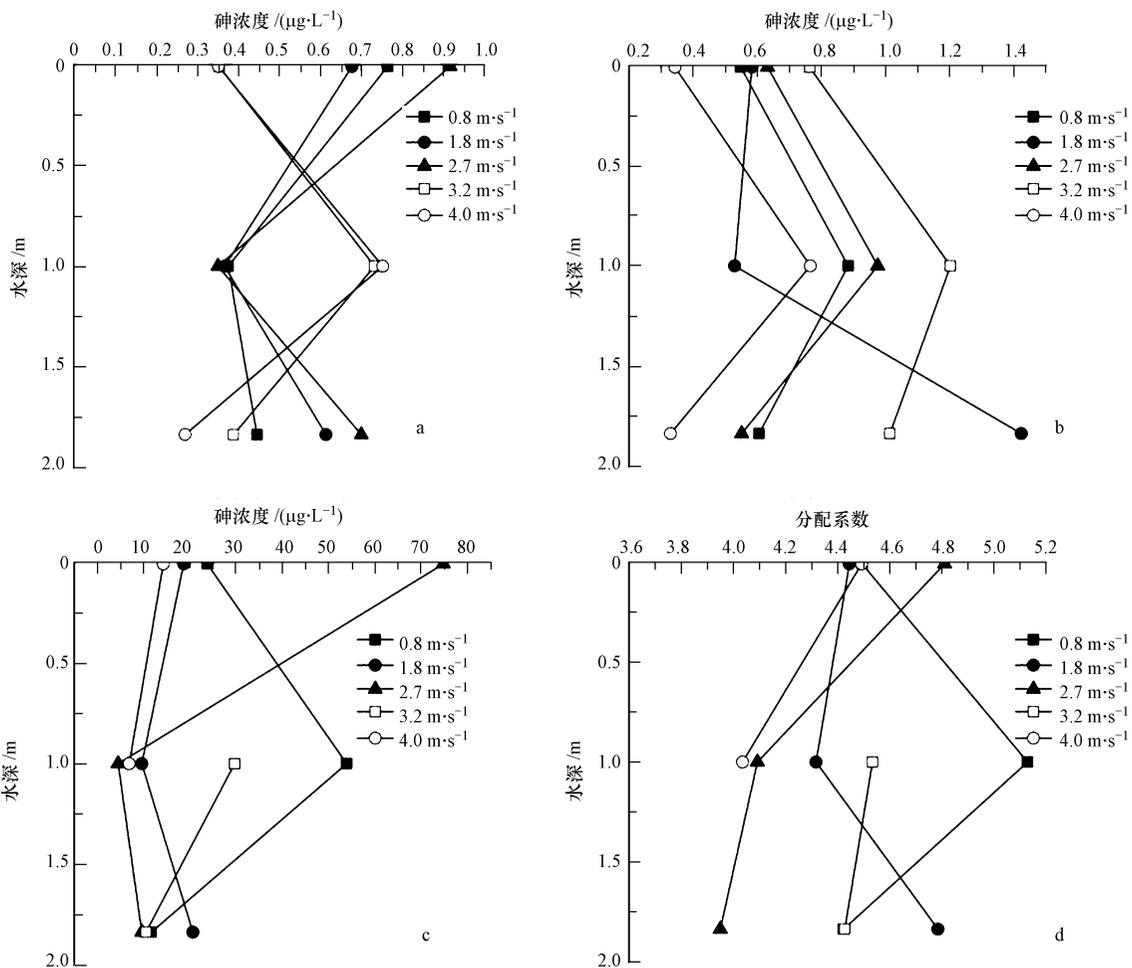


图 4 不同风速下溶解态砷(a)、总砷(b)、悬浮物砷(c)及分配系数(d)的垂向分布图

Fig.4 Vertical distribution of dissolved arsenic (a), total arsenic (b), arsenic in suspended solids (c) and partition coefficient (d) under different wind speeds

从图 4b 可以看出,除了 $1.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之外,其他风速下的水体总砷含量的垂向分布趋势是相同的,砷含量都在中层有所增加.各层的原水砷含量在 $0.8\sim 3.2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (不包括 $0.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 范围内随着风速的增加而升高,但在 $4.0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时候突然下降.而在 $0.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,原水砷含量在底层大幅度降低.在

风浪的影响下,总砷的变化范围在 $0.3\sim 1.4\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

图 4c 和图 4d 分别是不同风速下悬浮物砷和分配系数的垂向分布.虽然缺少 $3.2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 上层和 $4.0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下层的数据,但不影响整体的趋势判断.在 $0.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,悬浮物砷在中层的浓度较高,当风速增加

后,中层的悬浮物砷明显降低,除了 $2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 外,其他的风速下表层和下层的悬浮物砷浓度基本没有变化.而分配系数基本与悬浮物砷的分布特征相似.在 $2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,表层的悬浮物砷和分配系数都有不同程度的升高,而下层的悬浮物砷没有变化,分配系数在下层有明显的降低.

4 讨论 (Discussion)

4.1 风浪扰动对砷分配的影响

据报道,太湖日平均风速主要以 $2\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速为主,占全年日出现频率的 57.3%, $>5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速频率为 13.2% (范成新等, 2003),本研究的风速范围在 $0.8\sim 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间(表 1),是太湖的平均风速,所以研究此风速范围对砷的分配影响对太湖更有实际参考意义.

在不同风速下,溶解态砷的含量在不同深度变化比较大,特别是在中层,在风速变大后,溶解态砷含量有明显的升高(图 4a),但上、中、下 3 层的均值相差不大(表 3).风浪是导致沉积物再悬浮的重要自然因素之一,沉积物再悬浮释放的颗粒态重金属的量是巨大的,可能是水体中重金属的最主要内部来源(俞慎和厉红波, 2010).在小风速下,溶解态砷浓度可升高 2~3 倍.水体总砷浓度是随着风速的增加而增大的,风速的增加会加强水体的扰动,使 SS 增加(图 3),从而增加水体总砷的含量.而在 $4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下的低值可能是由于风速增加到一定值时,风浪较大,悬浮物分布不均,导致采样时可能采集的悬浮物较少,造成测定的水体总砷浓度较低.悬浮物砷浓度是随着风速增大而逐渐减少的,这与分配系数的规律类似,且悬浮物砷和分配系数呈正相关(表 4).由于分配系数的降低,悬浮物吸附砷的能力逐渐降低,所以悬浮物中的砷含量也随之降低.池俏俏等(2006)测定了 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Al、Ca、Fe、Mn 等元素,发现水体总悬浮颗粒态金属的量依次大幅度增加;而从中风浪到小风浪,单位悬浮物中 Al、Fe、Ni、Pb、Co、Cr 等含量则出现降低,这与本文结论一致.随着风浪作用的加强,溶解态砷有所增加,相应的悬浮物砷和分配系数降低,说明风浪作用可以降低悬浮物吸附砷的能力,以至于促进砷从悬浮物中的释放,进而使水体中的溶解态砷增加.

分配系数在风速加大的条件下有所降低,这可能与风浪扰动影响的悬浮物浓度、叶绿素以及溶解氧有关.Teeter 等(2001)发现湖水表面风扰动产生

的剪切力对沉积物的再悬浮起着主导作用,风速越大,悬浮物浓度越高,这与本研究中得到的结果一致(图 3).随着悬浮物浓度的升高,分配系数有降低的趋势,说明风浪作用可以通过悬浮物浓度来影响砷的分配系数.据报道,金属元素在水体总悬浮物中的含量主要受风浪和悬浮物总量的影响(池俏俏等, 2006),本研究中 SS 和悬浮物砷以及分配系数呈反比的关系(表 4),这可能是受到“颗粒物效应”的影响,随着颗粒物浓度的增加,颗粒物重金属含量有可能会降低,从而降低其固液分配系数(常静等, 2009).

叶绿素在风速达到 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,有明显的降低(表 2).在风场的作用下,藻类会随风向发生漂移,这也会使得叶绿素浓度的分布发生改变,风场对太湖叶绿素浓度的空间分布有着重要的影响(许遐祯等, 2012).在弱风浪时($6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下)悬浮物则以有机颗粒物为主(朱广伟等, 2004),藻类是悬浮物的重要组成部分.小球藻等绿藻对砷有良好的去除效率(李妍丽等, 2012),在风浪扰动的影响下叶绿素的降低,会降低悬浮物吸附砷的能力,从而使 $3\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的分配系数较低(图 4).

风速增加,风浪扰动作用增强,使水中的溶解氧增加(表 2).Jonge 等(2012)指出氧气浓度的增加可以提高重金属从沉积物中释放的能力,即 DO 的升高可以降低悬浮物吸附砷的能力,从而降低砷的分配系数.所以砷分配系数在风速变大时降低可能也与 DO 的升高有关.

4.2 风浪作用下砷含量及分配系数的分层特征

浅水湖泊是指水深在 5 m 以内、夏季无明显水温分层的湖泊.与深水湖泊相比,浅水湖泊单位体积的湖水具有的水土接触面更大,风浪等水动力作用更频繁地扰动湖底沉积物(Nixdorf and Deneke, 1997).太湖的深度是 1.845 m,属于“极浅水湖泊”(朱广伟等, 2004).在研究风浪作用对水体中重金属影响的研究中(池俏俏等, 2006, 2007; 张战平等, 2006),大多分析的是表层水在不同风浪下重金属的含量变化,没有进行垂向的分析.风浪所引起的是湖水的垂直紊动,所以研究湖水中重金属的垂向分布以及分层特征更能深入的了解风浪扰动对砷在水相和悬浮物相之间分配的影响.

从 SS 的垂向分布图来看, $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速下中层几乎为 0,悬浮物都集中在上层和下层.风速的变大使中层的 SS 增多,上层和下层略有减少.当风速

增加到 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,受强烈水动力扰动,中层有减少的趋势(图 2).风浪扰动主要对中下层的 SS 影响较大.胡春华等在沉积物的再悬浮研究中也得出了类似的结论,风浪对沉积物的扰动引起的再悬浮作用,在水体的底层更为强烈(胡春华等, 2005).溶解态总砷在 $0.8\sim 2.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $3.2\sim 4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 是完全相反的分布特征,在风速增加的情况下,中层的浓度升高,上下层浓度降低,说明不同深度的水体都受到了不同程度风浪的影响(图 4a).中层水体中溶解态总砷在风速变大的时候增加,可能与分配系数的降低有关.总砷的分层特征也很明显,除了 $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之外,其他风速下的总砷的中层较上层和下层高,在风速变大的情况下,上中下层的总砷浓度都有所升高. $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 在下层的突然升高可能与生物活动有关(图 4b).总体说来,风浪扰动并未影响水体总砷的分层特征.从分配系数的分层特征来看,当风速从 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至 $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,表层变化不大,中层有明显的降低;风速为 $2.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时表层的分配系数略有升高,中层和下层有所降低;总体来说,中层和下层的变化比较剧烈,随着风速的增加有降低的趋势(图 4d).悬浮物总砷和分配系数的垂向分布特征类似,不同在于悬浮物总砷在下层的变化不大,而在 $2.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速下上层的浓度明显升高(图 4c),可能是由于浅水湖泊中水质的均匀性较差,水动力作用存在很大的变动性;总体来说,风浪扰动对悬浮物总砷中层的影响较大.分析以上结果,可以看出风浪扰动对中下层的 SS 和分配系数及中层的悬浮物砷影响较大,溶解态砷会在风速变大时中层浓度升高,上下层浓度降低,而风浪扰动作用并未影响原水总砷的分层特征.

本研究发现当风速达到 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时候,各参数的分层特征都会发生变化.有研究报道,在小风速条件下,波浪与湖流产生的切应力大致相当,但是当风速较大时,波浪作用占主导,导致沉积物悬浮物所需的临界切应力约为 $0.03\sim 0.04\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$,相当于野外风速达 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的情况.如果动力强度大于此临界值,沉积物将发生大规模悬浮.(秦伯强等, 2003b).这说明 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 是一个临界风速,在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的风速下风浪占主导作用.悬浮物浓度、砷浓度及分配系数都在 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下有不同程度分层特征及浓度上的变化,可能是因为小于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速时的风浪作用对沉积物的再悬浮没有起到很明显的影 响,而是湖流与风浪共同作用的结果.

5 结论(Conclusions)

风浪扰动对砷在水体和悬浮物中的含量均有不同程度的影响.随着风浪作用的加强,溶解态砷和水体总砷浓度会升高 $2\sim 3$ 倍,相应的悬浮物总砷和分配系数有所降低,说明风浪作用可以降低悬浮物吸附砷的能力,以至于促进砷在悬浮物中的释放,进而使水体中的溶解态砷增加.通过相关性分析及变化趋势的比较,可以得知砷分配系数的降低与在风浪扰动的影响下悬浮物浓度和溶解氧的增加以及叶绿素 a 浓度的下降有关.通过不同风速下砷含量以及分配系数的垂向分布图可以看出风浪扰动主要对中下层的 SS,分配系数的影响比较大.溶解态总砷分层特征比较明显,风速达到 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时候,分层特征发生逆转.而风浪扰动并未影响原水总砷的分层特征.悬浮物砷和分配系数的垂向分布相似,但下层的变化不大.悬浮物浓度,砷浓度以及分配系数在 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下有不同程度分层特征以及浓度上的变化,可能是因为小于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速时的风浪作用对沉积物的再悬浮没有起到很明显的影 响,而是湖流与风浪共同作用的结果.

责任作者简介: 韦朝阳(1965—),男,博士,研究员,博士生导师.长期从事湖泊水环境、矿区土壤环境砷、镉以及其他重金属的生态健康效应与修复技术研究. E-mail:weicy@igsnr.ac.cn.

参考文献(References):

- 常静,刘敏,李先华,等. 2009. 城市路面径流重金属固液分配系数及其影响因素[J]. 水科学进展, 20(5): 714-720
- 池俏俏,朱广伟,张战平,等. 2006. 风浪扰动对太湖水体悬浮物重金属含量的影响[J]. 湖泊科学, 18(5): 495-498
- 池俏俏,朱广伟,张战平,等. 2007. 风浪扰动对太湖水体重金属形态的影响[J]. 环境化学, 26(2): 228-231
- 范成新,张路,秦伯强,等. 2003. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 33(8): 760-768
- 顾丁锡,黄漪平. 1981. 我国主要湖泊水质污染状况的初步评价[J]. 水文, (5): 29-36
- 郭莉霞,王远亮,辛娟. 2005. 痕量砷测定方法的研究进展[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 28(9): 124-128
- 胡春华,胡维平,张发兵,等. 2005. 太湖沉积物再悬浮观测[J]. 科学通报, 50(22): 2541-2545
- 金雪莲,任婧,夏峰. 2012. 我国河流湖泊砷污染研究进展[J]. 环境科学导刊, 31(5): 26-31
- Jonge M D, Teuchies J, Meire P, et al. 2012. The impact of increased oxygen conditions on metal-contaminated sediments part I: Effects

- on redox status, sediment geochemistry and metal bioavailability[J]. *Water Research*, 46(7): 2205-2214
- 李国莲, 刘桂建, 姜萌萌, 等. 2011. 巢湖表层沉积物与上覆水体中重金属分配特征及其相关性研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 41(1): 9-15
- 李妍丽, 刘健, 柯林. 2012. 多种藻类对 As(Ⅲ)的耐受性及吸附研究[J]. *安徽农业科学*, 40(15): 8702-8706
- Linge K L, Oldham C E. 2002. Arsenic remobilization in a shallow lake: the role of sediment resuspension [J]. *Journal of Environmental Quality*, 31(3): 822-828
- Nixdorf B, Deneke R. 1997. Why 'very shallow' lakes are more successful opposing reduced nutrient loads[J]. *Hydrobiologia*, 342-343: 269-284
- 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 2003a. 太湖水环境演化的过程与机理[M]. 北京: 科学出版社
- 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 2003b. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. *科学通报*, 48(17): 1822-1831
- Teeter A M, Johnson B H, Berger C, *et al.* 2001. Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons) [J]. *Hydrobiologia*, 444(1/3): 1-23
- Valderrama J C. 1981. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters[J]. *Marine Chemistry*, 10(2): 109-122
- 王苏民, 窦鸿身. 1998. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社
- 许遐祯, 钱昊钟, 赵巧华. 2012. 风场对太湖叶绿素 a 空间分布的影响[J]. *生态学杂志*, 31(5): 1282-1287
- 杨玉珍, 夏未铭, 杨瑾, 等. 2011. 水体中叶绿素 a 测定方法的研究[J]. *中国环境监测*, 27(5): 24-27
- 俞慎, 历红波. 2010. 沉积物再悬浮-重金属释放机制研究进展[J]. *生态环境学报*, 19(7): 1724-1731
- 张战平, 朱广伟, 秦伯强, 等. 2006. 风浪扰动对太湖水体中胶体态痕量金属含量的影响[J]. *中国环境科学*, 26(6): 662-666
- 朱广伟, 秦伯强, 高光. 2004. 强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂向分布特征[J]. *水科学进展*, 15(6): 775-780
- Zhu G W, Chi Q Q, Qin B Q, *et al.* 2005. Heavy-metal contents in suspended solids of Meiliang Bay, Taihu Lake and its environmental significances [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 17(4): 672-675
- 朱广伟, 秦伯强, 高光. 2005. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. *科学通报*, 50(1): 66-71