

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.022

风浪对浅水湖泊水质的影响机制

徐瑞忠¹, 陆雪林¹, 盛根明², 胡 静²

(1. 江苏省苏州市吴江区水利局, 江苏 苏州 215200; 2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要:以太湖重要的浅水湖湾——东太湖为例,应用经典风浪经验公式,将风速转化为浪高,以直接体现风浪强度,在分析其与污染底泥卷起、水质指标相关关系的基础上,对风浪影响湖区水质的机制进行进一步探究。结果表明:随着风速、浪高的增加,水体浑浊度增加,偏北风作用下湖区浑浊度更高;DO 的质量浓度呈降低趋势,全年浓度呈现冬季偏高而夏季偏低的规律;COD 的质量浓度呈增加趋势,全年浓度呈现冬季偏高而夏季偏低的规律;TN 的质量浓度与风速相关关系不明显,全年浓度呈现夏季偏高而冬季偏低的规律;浑浊度与 COD 存在较好的相关性。确定风浪对湖区水质的影响机制,旨在为针对性地制定湖泊水质改善措施提供技术支撑。

关键词:浪高;浑浊度;底泥卷起;水质指标;东太湖

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)03-0117-04

Influencing mechanism of wind waves on water quality in shallow lake

XU Ruizhong¹, LU Xuelin¹, SHENG Genming², HU Jing²

(1. Wujiang Water Conservancy Bureau of Suzhou City, Suzhou 215200, China;

2. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: Taking East Taihu Lake, an important shallow water bay of Taihu Lake, as an example, the influencing mechanism of wind waves on water quality in the shallow lake was discussed. The wind speed was translated into wave height using the classic wind-wave empirical formula to directly reflect the strength of wind wave, and the correlation relationships between the wind wave, polluted sediment rolling up, and water quality indices were analyzed. Results show that the water turbidity increases with the wind speed and wave height and is higher under the north wind. The concentration of DO decreases with the wind speed and wave height and is higher in winter and lower in summer. The concentration of COD increases with the wind speed and wave height and is higher in winter and lower in summer. The concentration of TN has no obvious correlation with the wind speed and is higher in summer and lower in winter. The water turbidity has good correlation with the concentration of COD. Study on the influencing mechanism of wind waves on water quality in the shallow lake can provide technical support for establishing lake water quality improvement measures.

Key words: wave height; water turbidity; polluted sediment rolling up; water quality index; East Taihu Lake

风浪是由风作用于湖面所产生的一种水质点周期性起伏运动,风浪所引起水体的垂直紊动对水体理化性质的分布、污染物迁移扩散、底泥掀起、浮游生物的迁移等过程均造成一定影响^[1]。风浪对底质的作用研究常见于沙质海岸及河口地区,研究内容通常为风浪对地形的塑造及悬浮物质的迁移

等^[2-3]。在浅水湖泊中,通常认为水流作用较大,而风浪的影响相对较少,研究主要集中在风浪对湖水透明度、水下光照分布、营养盐的内源释放和初级生产力的影响等^[4]。21 世纪初已经有部分学者通过在太湖的野外调查数据初步建立起风速与底泥悬浮的直接关系,张运林等^[5]通过测量 3 种风速下水中

作者简介:徐瑞忠(1970—),男,高级工程师,主要从事水生态研究。E-mail:597712157@qq.com

悬浮物浓度的增加量,判断底泥悬浮临界风速大约在 $5 \sim 6.5 \text{ m/s}$ 之间,而秦伯强等^[6]在类似的观测后得出的结果则为 4.0 m/s 。在这些研究的基础上,陆续产生了更多关于风速与底泥悬浮、内源释放量的相互关系的研究^[7-8],这类研究均试图在实测风速与底泥或内源释放量之间找到直接的相关关系,而并没有体现风生成风浪、再作用于底部泥沙的这一过程。荷兰 Delft 大学 Vijverberg 等^[9]曾在 Markermeer 湖上现场收集了一系列浪高、湖底床面切应力以及距离湖底 0.5 m 处的水体浑浊度资料,发现浪高与底泥床面切应力变化趋势吻合度很高;随后在 Kelderman 等^[10]的水槽实验中,他们进一步得出了悬浮物浓度(SS)与底切应力的经验公式,反映了浅水湖中风浪对悬浮物浓度的影响机制。

太湖平均水深 1.89 m ,是典型的平原浅水湖泊,东太湖是太湖的重要浅水碟形湖湾,也是区域重要的饮水水源地。遇大风天气,特别是在台风期间,湖底污泥被风浪掀起,湖区浑浊度增大,加速底泥中污染物质释放,严重影响水源地水质。本文以东太湖为例,应用经典风浪经验公式,将风速转化为浪高以直接体现风浪强度,分析其与污染底泥卷起、水质指标相关关系,进一步探究风浪影响湖区水质的机制。

1 东太湖概况

东太湖位于苏州市以南,是太湖东南部的一个狭长形湖湾(图1),南起东茭嘴至陆家港一线,北端一直延伸到瓜泾口,全长约 32 km ,最大宽度 9 km ,湖区面积 172.1 km^2 。东太湖多年平均水位 3.0 m ,湖底高程一般不超过 2.0 m 。东太湖是太湖的主要

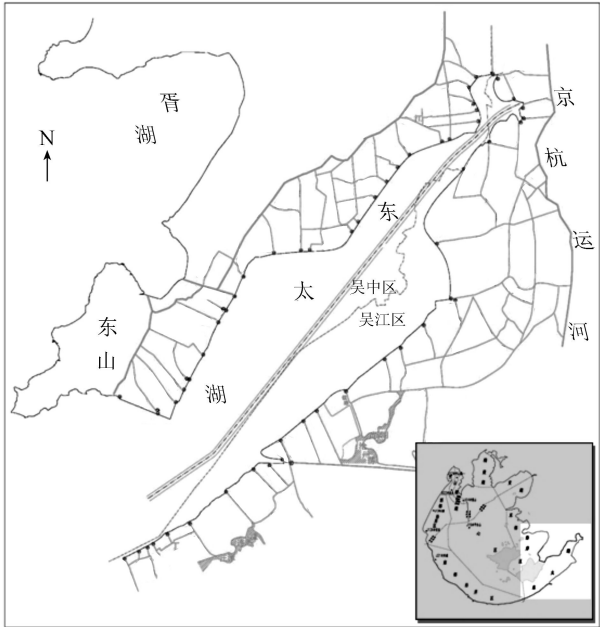


图1 东太湖湖区及周边水系

出水通道,也是流域重要的水源地。

2 风浪与污染底泥卷起的关系分析

2.1 风速、风向对东太湖浑浊度影响规律分析

根据东太湖 2011 年逐日风向、风速及源水浑浊度资料,对取水口月平均浑浊度、最大日浑浊度以及对应日风向、风速进行分析,结果见图2。

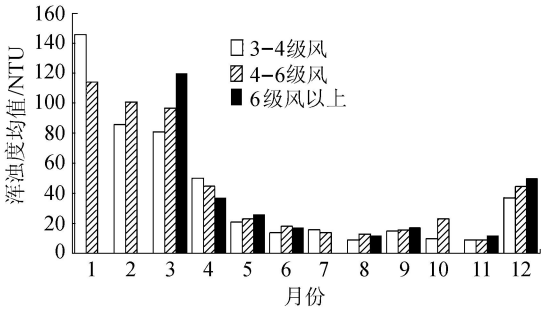


图2 2011 年各月浑浊度均值与风速关系

由实测资料可以得到,当风速为 $3 \sim 4$ 级时,浑浊度年均值为 40 NTU ;当风速为 $4 \sim 6$ 级时,浑浊度年均值为 43 NTU ;当风速大于 6 级时,浑浊度年均值为 46 NTU 。由此可见,东太湖浑浊度随风速的增加而增加。部分月份没有 6 级以上大风出现,如 1、2 月,因此图2中部分月份“ 6 级以上”无数据。

东太湖湖面呈狭长的形状,不同风向对应的影响风区长度也有较大差距。在偏北风作用下,最大风区长度达 41 km ,风浪较大,易卷起底泥;东南风作用下风区长度较小,风浪较弱,不易卷起底泥。相同风速、不同风向条件下,掀起不同波高的风浪,对底泥的作用强度不同。东太湖冬季主导风向为偏北风,夏季多为东南风,图3中可见,东太湖冬季浑浊度远远高于夏季,所以,东太湖在偏北风作用下浑浊度较高。

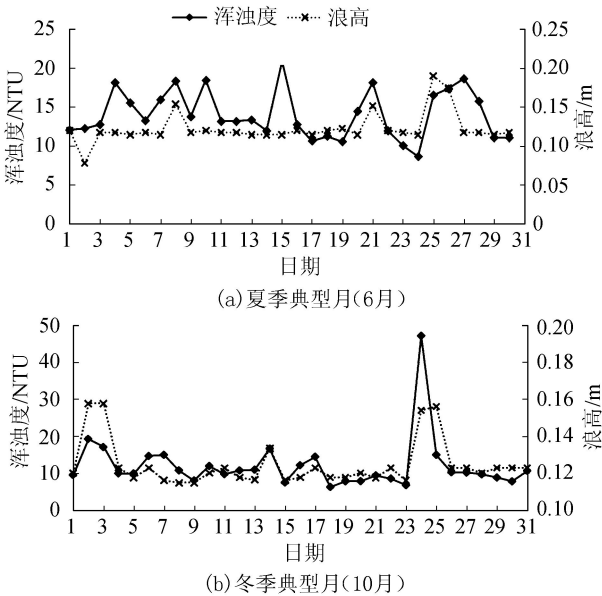


图3 东太湖夏季和冬季典型月逐日浪高与浑浊度对比

2.2 浪高与浑浊度关系分析

浅水湖泊风浪掀起底泥中沉积物的再悬浮主要是由于波浪的作用,根据莆田试验站经验公式^[11],可计算出每日平均风速和主要风向条件下的浪高。

$$\frac{g\bar{H}}{v^2} = 0.13 \tanh \left[0.7 \left(\frac{g\Delta h}{v^2} \right)^{0.7} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0.0018 \left(\frac{gF}{v^2} \right)^{0.45}}{0.13 \tanh \left[0.7 \left(\frac{g\Delta h}{v^2} \right)^{0.7} \right]} \right\} \quad (1)$$
$$\frac{g\bar{T}}{v^2} = 13.9 \left(\frac{g\bar{H}}{v^2} \right)^{0.5} \quad (2)$$

式中: $\bar{H}$ 为平均浪高; $\bar{T}$ 为平均波周期; v 为设计风速; F 为风区长度; Δh 为水域平均水深; g 为重力加速度。东太湖区域平均水深为1.0 m,风速取吴江区当日实测日均风速,风区长度按照实测主导风向,取其所在的方向上最大湖面宽度。因此计算结果中同时包含风速和风向变化对浪高的影响。

计算结果表明,东太湖区域大部分时间的浪高大约在11~12 cm之间,此时风速约为5.5 m/s,大风天气下(风速达到7.0~10.0 m/s)浪高可达15~20 cm。根据2001年9月太湖梅梁湖湾中部的固定点的实测风速与有效浪高资料,当实际风速在3.0~6.0 m/s时,有效浪高在9~15 cm左右,风速在6.0~8.0 m/s时,有效浪高约为15~18 cm,因此认为莆田经验公式可以应用于东太湖地区。

影响浪高的最主要因子是风速和风区长度,风速越大浪高越大;相同平均风速下,浪高将随着风区长度的增大而增大。分别选取夏季典型月(6月)和冬季典型月(10月)的计算浪高和浑浊度记录数据(图3)进行比较,可见浪高与浑浊度存在较好的正相关关系。

2.3 浪高变化对浑浊度影响分析

为了考察浪高显著增加或减小对浑浊度的影响,将浪高隔日增加或减小超过2cm的数据进行统计,结果见图4。浪高显著增加后,浑浊度随之增加;当浪高增加超过2 cm时,浊度随之增加的概率超过70%;当浪高减小超过2 cm时,浑浊度随之减小的概率仅为48%。这是因为风浪掀起底泥使之再悬浮的过程是较快速的,而底泥沉降过程较缓慢,即使风浪突然减小,悬浮颗粒也不会立即沉降。

3 风浪与东太湖水质的关系分析

3.1 风向、风速与东太湖水质的关系

东太湖地区夏季(6—8月)主导风向为东南风,冬季(12至次年2月)主导风向为西北风。采用

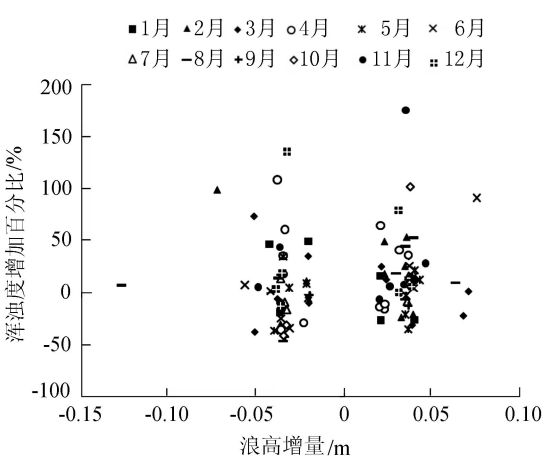


图4 浪高变化与浑浊度增加率关系

2011年逐日的风速风向资料以及东太湖湖区取水口的实时监测数据进行分析,可以初步发现东太湖DO、COD、TN质量浓度与风速的变化关系(图5)。

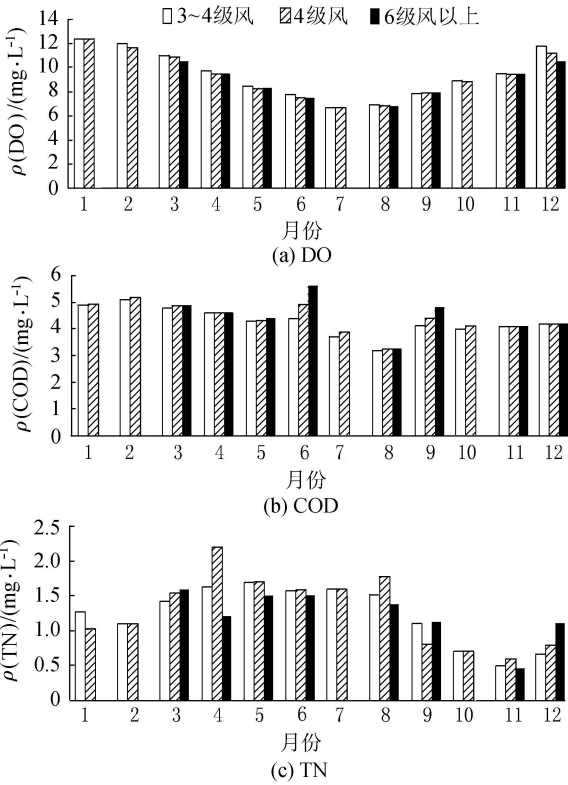


图5 2011年各月水质指标均值与风速关系

由图5可以看出,东太湖部分水质指标浓度与风速具有相关关系,随着风速的增加,DO的质量浓度呈现降低的趋势,全年浓度呈现冬季偏高而夏季偏低的规律;COD的质量浓度随着风速的增加有一定程度增加,全年呈现出冬季偏高而夏季偏低的规律;TN的质量浓度与风速相关关系不明显,全年呈现夏季偏高而冬季偏低的规律。

3.2 浪高与东太湖水质关系

东太湖地区春季风速较大,而4月以后水质指标浓度较冬季大大降低,因此为了观察风浪、悬浮物

与水质的关系,选取风速大、浑浊度高的 2011 年 3 月作为典型月份,对浪高与湖区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD 、 TP 的质量浓度的变化进行对比,分析浪高对水质指标的影响,结果见图 6。可见,风浪的大小与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD 、 TP 质量浓度具有一定的对应关系,受扰动底泥向水体释放污染物需要一定时间,风浪变大后,水质浓度的升高有时表现在当日,有时则会表现在隔日。

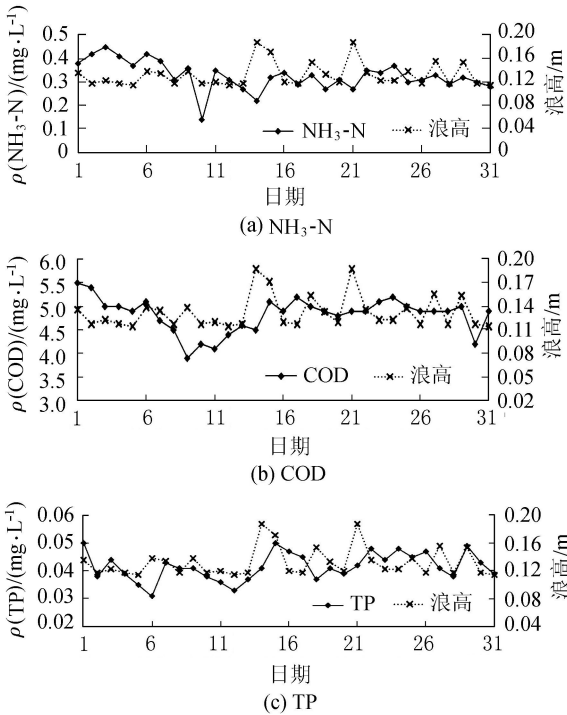


图 6 2011 年 3 月逐日浪高与水质指标变化关系

3.3 水质指标浓度与浑浊度的相关性

分析东太湖湖区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD 、 TP 的质量浓度与湖区浑浊度的相关关系,结果表明 COD 的质量浓度与浑浊度的相关性较好,其他水质指标与浑浊度相关性一般, COD 的质量浓度与浑浊度相关性图见图 7。说明底泥的再悬浮会引起 COD 的质量浓度的增加,存在风浪卷起底泥进而影响水质的污染模式。

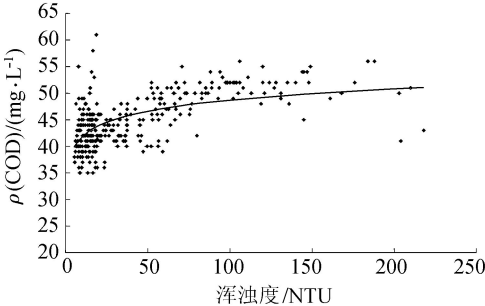


图 7 浑浊度与 COD 相关关系

4 结 论

以太湖重要的浅水湖湾——东太湖为例,应用经典风浪经验公式,将风速转化为浪高以直接体现

风浪强度,在分析风浪强度与污染底泥卷起、水质指标相关关系的基础上,对风浪影响湖区水质的机制进行探究,得到如下结论:

- a. 随着风速、浪高的增加,水体浑浊度增加,偏北风作用下湖区浑浊度更高。
- b. 随着风速、浪高的增加, DO 质量浓度呈现降低趋势,全年呈现冬季(西北风主导风向)偏高而夏季(东南风主导风向)偏低的规律; COD 质量浓度随着风速的增加而增加,全年呈现冬季偏高而夏季偏低的规律; TN 质量浓度与风速相关关系不明显,全年呈现夏季偏高而冬季偏低的规律。
- c. 东太湖风浪卷起底泥,造成湖区的浑浊度升高,浑浊度与 COD 质量浓度存在较好的相关性,东太湖存在风浪卷起底泥进而影响水源地取水口水质的污染模式。

参考文献:

[1] 王苏民. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 70-73.

[2] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 悬浮物浓度对水下光照及初级生产力的影响[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 615-620. (ZHANG Yunlin, QIN Boqiang, CHEN Weimin, et al. Experimental study on underwater light intensity and primary productivity caused by variation of total suspended matter[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 615-620. (in Chinese))

[3] QIN B Q, HU W P, GAO G, et al. Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow lake Taihu, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 49(1): 54-64.

[4] 池俏俏, 朱广伟, 张战平, 等. 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, 2006, 18(5): 495-498. (CHI Qiaqiao, ZHU Guangwei, ZHANG Zhanping, et al. Effects of wind-wave disturbance on heavy metal contents in suspended solids of Lake Taihu[J]. Lake Science, 2006, 18(5): 495-498. (in Chinese))

[5] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体中悬浮物研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3): 266-271. (ZHANG Yunlin, QIN Boqiang, CHEN Weimin, et al. A study on total suspended matter in Lake Taihu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(3): 266-271. (in Chinese))

[6] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 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, 2003, 48(17): 1822-1831. (QIN Boqiang, HU Weiping, GAO Guang, et al. Dynamic mechanism and conceptual model of internal release of sediment suspension in Taihu Lake[J]. Chinese Science Bulletin, 2003 48(17): 1822-1831. (in Chinese))

(下转第 142 页)

越大,盐分迁移速率越小,盐分迁移方式以分子扩散为主。但是总体来看,在相同迁移时间内,当水力坡度越大时,渗流速度越大,水动力弥散作用越显著,盐分迁移的速度越快,盐分迁移的效率越高。

c. 淤泥质黏土由于其弱渗透性,盐分迁移的速度很缓慢。对比土壤盐分静态和动态迁移试验结果,静态迁移方式适用于土壤盐分分布较浅、附近有大量优质水源的地区,而动态迁移方式用水量较少,不同水力坡度下盐分迁移率接近一致,适用于土壤盐分分布较深的地区。

参考文献:

[1] 彭建,王仰麟. 我国沿海滩涂景观生态初步研究[J]. 地理研究, 2000, 19 (3) : 249-256. (PENG Jian, WANG Yanglin. Preliminary studies on the landscape ecology of coastal tidal flats in China [J]. Geographic Research, 2000, 19 (3) : 249-256. (in Chinese))

[2] 付腾飞. 滨海盐渍土水盐运移过程实时自动监测研究 [D]. 青岛:中国海洋大学,2012;1-13.

[3] LI L, ZHU J R, WU H. Impacts of wind stress on saltwater intrusion in the Yangtze Estuary [J]. Science China, 2012, 55 (7) : 1178-1192.

[4] ZHOU W, WANG D X, LUO L. Investigation of saltwater intrusion and salinity stratification in winter of 2007/2008 in the Zhujiang River Estuary in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31 (3) : 31-46.

[5] CHENG Q, ZHU J R, GU Y L. Impact of seasonal tide variation on saltwater intrusion in the Changjiang River estuary [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30 (2) : 342-351.

[6] 刘虎,黄明勇,尹春艳,等. 蒸发条件下脱盐吹填土的水盐动态 [J]. 水土保持学报, 2010, 24 (2) : 87-91. (LIU Hu, HUANG Mingyong, YIN Chunyan, et al. Water and salt dynamics of soil under evaporation [J]. Soil and Water

Conservation, 2010, 24 (2) : 87-91. (in Chinese))

[7] 池云飞. 台州湾岸滩演变分析及其滩涂围垦的可持续研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2010; 7-10.

[8] 刘广明,杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究 [J]. 土壤通报, 2001, 32 (增刊 1) : 85-87. (LIU Guangming, YANG Jinsong. The relationship between salt content of soil and soil conductivity and moisture content of soil [J]. Soil Bulletin, 2001, 32 (sup1) : 85-87. (in Chinese))

[9] 周志芳,王锦国. 地下水动力学 [M]. 北京:科学出版社, 2013; 153-168.

[10] 王美丽,李军,岳甫均,等. 天津盐渍化农田土壤盐分变化特征 [J]. 生态学杂志, 2011, 30 (9) : 1949-1954. (WANG Meili, LI Jun, YUE Fujun, et al. Change characteristics of soil salt content in salinized farmlands in Tianjin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30 (9) : 1949-1954. (in Chinese))

[11] 花芳. 水平单裂隙溶质运移弥散系数及其尺度效应实验研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2010; 14-16.

[12] 成建梅. 考虑可信度的弥散度尺度效应分析 [J]. 水利学报, 2002, 33 (2) : 90-94. (CHENG Jianmei. Considering the scale effect of the dispersion of credibility [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33 (2) : 90-94. (in Chinese))

[13] 胡中雄,李向约,周建敏,等. 击实黏性土分子扩散系数的测定 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16 (6) : 132-139. (HU Zhongxiong, LI Xiangyue, ZHOU Jianmin, et al. Determination of molecular diffusion coefficient of compacted cohesive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16 (6) : 132-139. (in Chinese))

[14] 王秉忱,杨天行,王宝金,等. 地下水污染地下水水质模拟方法 [M]. 北京:北京师范学院出版社, 1985; 80-85.

(收稿日期:2015 - 06 - 06 编辑:王 芳)

(上接第 120 页)

[7] 逢勇,颜润润,余钟波,等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究 [J]. 环境科学, 2008, 29 (9) : 2456-2464. (PANG Yong, YAN Runrun, YU Zhongbo, et al. Suspension-sedimentation of sediment and release amount of internal load in Lake Taihu affected by wind [J]. Environmental Science, 2008, 29 (9) : 2456-2464. (in Chinese))

[8] 范成新,张路,秦伯强,等. 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), 2003, 33 (8) : 760-768. (FAN Chengxin, ZHANG Lu, QIN Boqiang, et al. Estimation of dynamic release of phosphorous in suspended particles under wind waves in Taihu Lake [J]. Scientia Sinica Terrae, 2003, 33 (8) :

760-768. (in Chinese))

[9] VIJVERBERG T, WINTERWERP J C, AAMINKHOF S G J, et al. Fine sediment dynamics in a shallow lake and implication for design of hydraulic works [J]. Ocean Dynamics, 2010, 61 (2/3) : 187-202.

[10] KELDERMAN P, ANGWEYA R O, ROZARI P D, et al. Sediment characteristics and wind-induced sediment dynamics in shallow Lake Markermeer, the Netherlands [J]. Aquatic Sciences, 2012, 74 (2) : 1-13.

[11] SHENG Y P, LICK W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1979, 84 (C4) : 1809-1826.

(收稿日期:2015 - 03 - 12 编辑:王 芳)