

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 ..... 许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)

兰州春夏季 PM<sub>10</sub> 碳组分昼夜变化特征与来源分析 ..... 马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)

海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 ..... 王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)

2015年北京城区大气 PM<sub>2.5</sub> 中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 及前体气体的污染特征 ..... 丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)

北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 ..... 齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 ..... 胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张扬, 庄国强 (1327)

基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 ..... 李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)

过渡金属掺杂对镉锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 ..... 李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)

南水北调中线北京段水质状况分析 ..... 徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 ..... 杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)

基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 ..... 李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 ..... 王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 ..... 俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)

高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 ..... 王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)

三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 ..... 戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)

沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 ..... 金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)

广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 ..... 丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 ..... 边博, 周燕, 张琴 (1442)

锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 ..... 朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 ..... 杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)

UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 ..... 李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 ..... 韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸 ..... 李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)

锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 ..... 范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)

3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 ..... 郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 ..... 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 ..... 吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)

分散染料 neocron black(NB) 的生物降解特性 ..... 杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)

多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 ..... 南亚萍, 周国田, 苏雪莹, 袁林江 (1529)

生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 ..... 付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)

厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 ..... 曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 ..... 何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)

矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH<sub>4</sub> 厌氧去除特性 ..... 王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)

应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 ..... 孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)

畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 ..... 何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)

山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 ..... 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)

江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 ..... 王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕幽, 汤蜜 (1597)

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 ..... 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 ..... 陈珊, 丁成庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)

生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 ..... 张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)

淹水水稻土消耗 N<sub>2</sub>O 能力及机制 ..... 王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 ..... 李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)

施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响 ..... 杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 ..... 迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 ..... 彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 ..... 刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)

不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 ..... 金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响 ..... 孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)

重庆市居民头发重金属富集特征及其相关性分析 ..... 何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)

16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 ..... 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)

石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 ..... 黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 ..... 容跃 (1726)

《环境科学》征稿简则(1505) 《环境科学》征订启事(1682) 信息(1339, 1459, 1612)

# 锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果

朱广伟<sup>1</sup>, 李静<sup>1,2</sup>, 朱梦圆<sup>1</sup>, 龚志军<sup>1</sup>, 许海<sup>1</sup>, 杨桂军<sup>2</sup>, 张运林<sup>1</sup>, 秦伯强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122)

**摘要:** 为探索杭州西湖高有机质底泥内源磷释放的控制技术, 分别于春、夏、冬这 3 个季节采集西湖 8 个湖区原状泥柱, 进行室内磷释放过程连续培养, 研究锁磷剂 Phoslock<sup>®</sup> 对底泥磷释放通量的控制效果。结果发现, 西湖底泥冬、春季磷释放通量较小, 全湖平均分别为  $0.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$  和  $0.29 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , 而夏季则大幅度增高, 全湖平均释放通量为  $3.29 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , 每日全湖释放磷可达 23.7 kg (以 P 计); 空间上, 磷释放通量受底泥有机质含量控制, 底泥有机质污染重的湖区总体上磷释放通量大, 而与底泥磷含量及有效态磷含量关系不大; 投加  $630 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的锁磷剂能够有效控制西湖底泥磷释放, 在 3 个季节所有点位, 均能将上覆水磷含量控制在  $0.010 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下, 夏季磷释放通量大的时期, 锁磷剂的控磷效果达 98%。本研究结果表明, 即便对于高有机质含量、“香灰土”特征的西湖沉积物, 锁磷剂的控磷效果也比较好。在西湖富营养化治理工程中, 可以考虑在局部湖湾投放应用。

**关键词:** 杭州西湖; 底泥; 磷; 内源负荷; 锁磷剂

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1451-09 DOI: 10.13227/j.hjx.201609123

## Efficacy of Phoslock<sup>®</sup> on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China

ZHU Guang-wei<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1,2</sup>, ZHU Meng-yuan<sup>1</sup>, GONG Zhi-jun<sup>1</sup>, XU Hai<sup>1</sup>, YANG Gui-jun<sup>2</sup>, ZHANG Yun-lin<sup>1</sup>, QIN Bo-qiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Environment and Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Famous as the world cultural heritage, West Lake in Hangzhou city has plenty of soft sediments with high organic matter content. To search the countermeasures for internal phosphorus release reduction from the sediment, the sediment core incubation was conducted to understand the efficacy of Phoslock<sup>®</sup> on internal phosphorus release in spring, summer and winter, respectively. The results showed that the internal phosphorus release fluxes in winter and spring were relatively low, with averaged values in the entire lake of  $0.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$  and  $0.29 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , respectively, while the release flux was  $3.29 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$  in summer, more than ten times higher than those in spring and winter. It was estimated that 23.7 kg of phosphorus could be released from sediment in the entire lake every day in summer. Spatially, the phosphorus release flux was related to organic matter contents in sediments, but not the phosphorus or bioavailable phosphorus contents in sediments in West Lake. With Phoslock<sup>®</sup> added at the rate of  $630 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , sediment phosphorus release was successfully controlled, which reduced the phosphorus concentration in the lake water to less than  $0.010 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Especially during summer time, the sediment phosphorus release was reduced by 98% after Phoslock<sup>®</sup> application. The research suggested that Phoslock<sup>®</sup> is powerful for phosphorus control even for sediments with high organic matter content, which could be considered in ecological restoration of West Lake.

**Key words:** West Lake; sediment; phosphorus; internal loading; Phoslock<sup>®</sup>

我国城市湖泊普遍存在富营养化问题<sup>[1]</sup>。当前随着城市化的加剧和水生态建设的推进, 城市湖泊的富营养化治理显得更加迫切。杭州西湖是我国开展城市湖泊富营养化治理最早、单位面积投入强度最大、技术尝试最全面的城市湖泊之一<sup>[2,3]</sup>。然而, 直至今日西湖的水质状况仍不能令人满意, 2013 年外湖总磷平均值仍达  $0.046 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。其中的原因之一与西湖独特的“香灰土”底质及其带来的营养盐内源释放问题有关<sup>[5]</sup>。作为一个浅水湖泊, 西湖底泥与水相的营养盐交换十分密切。加之西湖底泥

中有机质含量很高, 氮、磷的含量也很高, 对水相的影响就更为强烈<sup>[6,7]</sup>。西湖藻类生长模型模拟结果表明, 削减底泥内源磷释放对藻类生物量的控制效果最佳<sup>[8]</sup>。因此, 降低西湖水体营养盐, 必须严格控制磷的内源释放。

关于底泥内源的控制技术, 主要有疏浚技术、

收稿日期: 2016-09-17; 修订日期: 2016-11-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-007-005)

作者简介: 朱广伟(1972~), 男, 研究员, 主要研究方向为湖库富营养化防控, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

覆盖技术、固定磷试剂投放、底层曝氧及生态修复控制等。其中,近 60 年来疏浚工程已在西湖大规模实施了 2 次,特别是 1999~2003 年针对富营养化控制的疏浚,取得了一定的效果<sup>[3]</sup>,但是磷的控制还不够理想。西湖内源磷控制困难的原因与西湖“香灰土”底质有关,这种有机质含量高、易于再悬浮的“香灰土”底泥淤积厚度大,彻底疏浚的难度也大<sup>[5]</sup>。因此,有必要探索固定磷试剂投放的工程控制手段。

锁磷剂 (Phoslock<sup>®</sup>) 是澳大利亚水河协会 (WRC) 及科工组织 (CSIRO) 推出的一种原位控制湖泊和溪流水体底泥磷活性的一种产品<sup>[9]</sup>,其主要成分是氧化镧与膨润土的混合物,通过镧离子与磷酸根离子反应形成磷镧镨矿等难溶化合物,钝化水土界面的磷,控制磷的内源释放。该产品首先在澳大利亚西海岸的两条河流中进行了性能测试<sup>[9]</sup>,之后在世界上越来越多的湖泊进行了尝试、应用,大部分湖泊的使用效果比较理想<sup>[10,11]</sup>。锁磷剂在我国滇池、太湖长广溪以及天津的一些河道也进行了性能测试,初步效果较理想<sup>[12~15]</sup>,但均没有进行生产性的应用。

为探索杭州西湖及其类似的城市高有机质含量“香灰土”底泥的磷释放控制途径,本研究分别在春、夏、冬这 3 个季节采集西湖 8 个湖区的原状泥柱,采用泥柱连续培养法测定了底泥磷的释放通量,并测试了锁磷剂投加对底泥磷释放通量的控制效果,以期对西湖等相关城市湖泊富营养化控制提供科学依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 采样点布设与样品采集

杭州西湖东靠杭州市城区,其余三面环山,南北长 3.2 km,东西宽约 2.8 km,面积 6.39 km<sup>2</sup>,平均水深 2.2 m,水体容量约为 1 429 万 m<sup>3</sup>。西湖的所有湖湾之间都可以通过桥洞、小溪等沟通,有些区域相对封闭,有些湖湾相对开敞(图 1)。在西湖 8 个湖区采集泥柱进行内源释放通量测定及锁磷剂控磷效果测试,布点位置如图 1。其中各点的代表性为:①小南湖(XH1):代表西湖引水工程首要影响区及水质相对优良湖区,因调水入湖,换水很快,湖湾面积约 0.20 km<sup>2</sup>;②茅家埠(XH3),代表西湖西进等西部湾区,受西湖引水工程的影响也比较大,水质较优良,湖湾面积约 0.33 km<sup>2</sup>;③西里湖(XH4),代表有机质淤积历史长、水域相对封闭的西部湖区,水

质一般,湖湾面积约 0.78 km<sup>2</sup>;④外湖南(XH5),代表旅游活动频繁、“香灰土”清淤不彻底的开敞湖区,水质较差,代表区域面积约 0.90 km<sup>2</sup>;⑤外湖中(XH6),代表西湖最为开阔的外湖主体部分,1999~2002 年的疏浚重点区域,水质一般,代表区域面积约 2.23 km<sup>2</sup>;⑥外湖北(XH7),靠近外湖传统的下游,“香灰土”清淤较彻底,水质仍一般,代表区域面积约 1.33 km<sup>2</sup>;⑦北里湖(XH8),西湖北部相对封闭、旅游活动强,1999~2002 年的疏浚工程中没有实施疏浚,水质较差,湖湾面积 0.35 km<sup>2</sup>;⑧岳湖(XH9),西湖西北角相对封闭区域,水浅,也有引水工程入口,但水量较小,旅游活动强烈,水质一般,面积约 0.11 km<sup>2</sup>。

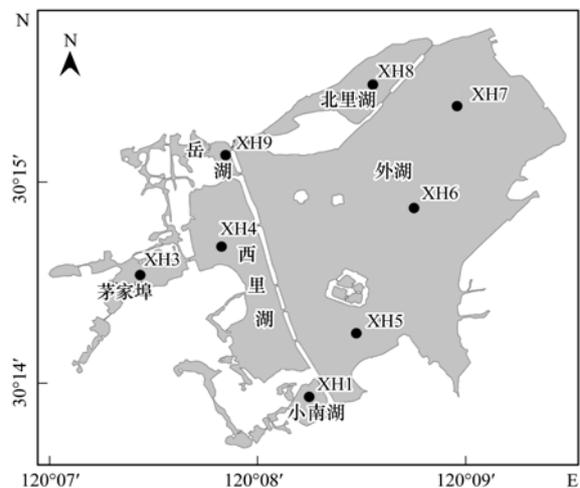


图 1 西湖采样点基本概况

Fig. 1 Description of the sampling sites at West Lake

采样的时间分别为 2014 年 4 月 14 日、7 月 28 日及 2015 年 1 月 12 日,温度上分别代表春(秋)季、夏季和冬季。

在每个点位,现场用手持式沉积物柱状泥样采集器,用内径 8.4 cm、高 50 cm 的有机玻璃管,采集 7 个原状泥柱;其中一支泥柱高约 35 cm 进行底泥基本属性分析,按照自上而下 2、3、5、5、5、5、5 cm 的厚度进行分层,用于有机质、总氮、总磷、SMT 法磷形态分步提取等指标测定,其余 6 支约 15 cm 高的泥柱,带到实验室进行磷释放通量测定培养,其中 3 支泥柱投加锁磷剂,3 支泥柱作为对照。

现场用赛氏透明度盘测定水体透明度(SD),美国 Yellow Spring 公司的多参数水质仪 YSI 6600V2 现场测定水温( $T$ )、电导率(EC)、溶解氧(DO)、pH 等。采集水样 1 L 带回实验室测定总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性反应性活性磷(DRP)以及浮游植物叶绿素 a 含量(Chl)。

## 1.2 底泥磷释放通量实验方法

将底泥高约 15 cm、上面充满上覆水的泥柱转移到阴凉且与气温接近的实验室内,避光培养. 每个泥柱的水土界面面积为  $55.4 \text{ cm}^2$ ,水柱高约 30 cm,则上覆水的总体积约 1 660 mL. 上端除采样外一直保持硅胶塞封闭状态;定期采集上覆水 30 mL 用于反应性活性磷测定,同时测定水柱的 DO、 $T$ 、pH 等.

锁磷剂由风斯乐(上海)水治理技术有限公司提供,试剂为灰色粗粉状,粉块直径小于 2 mm. 每个泥柱中加入 3.5 g 锁磷剂,相当于  $630 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的投放剂量. 投放方式为将锁磷剂溶于上覆水形成悬浊液,然后均匀撒入泥柱的方式. 锁磷剂刚投加时,水体呈乳白色,大约 24h 以后,水体完全清澈,底泥表面能看到一层薄薄的白色板结层.

从锁磷剂投加 24 小时开始,分别于 1、2、3、5、7、9、11、13 d 采集水样,测定 DRP 含量. 根据 DRP 随时间变化的曲线拟合,根据斜率和上覆水体积、泥柱表面积,获得磷释放速率  $[\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$  [16].

## 1.3 化学分析方法

水样的 TP 测定采用过硫酸钾消解、钼锑抗显色分光光度法(波长 700 nm). 对于 DRP 测定,先用  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜过滤后,不消解,直接用钼锑抗显色测定. Chl 测定采用热乙醇提取、分光光度法测定 [17].

底泥先进行冷冻干燥、研磨后,采用重铬酸钾在  $180^\circ\text{C}$  油浴氧化法测定有机质(OM)含量. 总氮测定采用将风干研磨的泥样加入 50 mL 去离子水中混合,然后加碱性过硫酸钾氧化消解,紫外分光光度法测定(波长 210 nm). 各形态磷的测定采用 SMT 连续提取法测定 [18],分别获得氢氧化钠提取磷(NaOH-P)、盐酸提取磷(HCl-P)、无机磷(IP)、有机磷(OP)以及总磷(TP),其中,NaOH-P 可以用于代表底泥中的活性磷含量状况 [19].

## 2 结果与分析

### 2.1 西湖底泥与水质性状

各采样点表层 15 cm 底泥的有机质及各形态磷含量如表 1.

表 1 西湖底泥性状及各形态磷含量

Table 1 Contents of organic matter, nutrients and phosphor forms in sediments from West Lake

样点	泥层 /cm	含水率 /%	OM / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	TN / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	TP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	NaOH-P / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	HCl-P / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	IP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	OP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
小南湖	0~2	77	79.9	5 063	1 800	462	477	1 148	374
小南湖	2~5	71	79.3	4 685	1 842	551	480	1 262	337
小南湖	5~10	68	71.7	3 877	1 463	354	593	1 154	191
小南湖	10~15	62	89.0	3 966	835	89	506	624	139
茅家埠	0~2	75	66.6	4 286	1 265	355	244	744	409
茅家埠	2~5	66	63.2	3 926	1 143	334	261	687	338
茅家埠	5~10	58	62.6	3 730	1 022	302	260	657	290
茅家埠	10~15	50	55.3	2 864	851	290	216	606	192
西里湖	0~2	84	186.1	7 806	1 197	226	347	644	404
西里湖	2~5	80	192.5	7 887	955	159	312	503	358
西里湖	5~10	80	205.4	7 486	773	122	237	402	290
西里湖	10~15	82	239.3	7 098	680	73	267	358	281
外湖南	0~2	88	159.5	7 572	877	138	336	512	320
外湖南	2~5	84	161.7	7 343	835	139	316	478	309
外湖南	5~10	83	169.5	6 827	742	102	316	453	275
外湖南	10~15	82	200.9	7 246	715	67	356	452	259
外湖中	0~2	77	93.6	4 919	624	51	407	462	157
外湖中	2~5	74	96.6	4 572	612	44	400	452	151
外湖中	5~10	71	96.5	4 280	622	30	424	454	132
外湖中	10~15	71	97.2	4 321	593	34	415	474	126
外湖北	0~2	71	72.2	3 556	445	46	237	297	124
外湖北	2~5	67	75.5	3 746	413	45	228	284	118
外湖北	5~10	65	77.8	3 593	397	37	220	266	113
外湖北	10~15	63	81.4	3 675	382	45	213	274	105
北里湖	0~2	85	137.7	6 023	547	82	151	259	258
北里湖	2~5	82	141.4	6 420	525	83	155	265	258
北里湖	5~10	80	139.7	6 179	473	73	127	214	233
北里湖	10~15	78	151.5	5 991	435	74	158	217	199
岳湖	0~2	62	44.0	2 949	834	128	500	648	135
岳湖	2~5	55	39.9	2 527	769	89	502	632	107
岳湖	5~10	49	41.0	2 577	741	91	504	611	100
岳湖	10~15	38	28.5	1 942	726	68	567	650	68

西湖底泥的有机质和总氮含量均很高,这是城市化湖泊经常出现的情况. 相比而言,外湖南、西里湖、北里湖底泥中有机质含量更高,表层 15 cm 平均值分别为 172.9、205.8、142.6  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 其余 5 个湖区底泥有机质含量均不超过 100  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值为 70.6  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中岳湖最低,为 38.4  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 3 个有机质含量高的湖区与前期底泥疏浚不彻底有关,如北里湖在 1999 ~ 2002 年的疏浚中就没有疏浚. 与非城市湖泊比,西湖底的总氮含量尤其高,平均值为 4960  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,由高到低的顺序为西里湖、外湖南、北里湖、外湖中、小南湖、茅家埠、外湖北、岳湖,与有机质含量的顺序基本一致,这与之前春季调查结果一致.

西湖底泥中 TP 含量空间差别较大. 就总磷而言,小南湖、茅家埠、西里湖、外湖南、外湖中、外湖北、北里湖、岳湖这 8 个点的表层 15 cm 平均值分别为 1485、1070、901、792、613、409、495、767  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,磷的含量状况与有机质、氮含量状况很不一致,反而是小南湖、茅家埠两个受引水影响大的区域含量高,而远离引水影响的北里湖、外湖北、外湖中等区域最低,这与调查之前想象的有机质污染重的地区磷污染重的预想并不一致.

西湖底泥的磷形态以无机磷为主:所有泥样的 TP 平均值为 697  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中 IP 平均值为 460

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,OP 平均值为 193  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,不足无机磷的一半. 这说明即便是在有机质较高的“香灰土”中,磷的结合形式还主要是以无机态为主. 西湖底泥中易释放态磷 NaOH-P 的总体平均值为 110  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,占总磷的 16%,其中表层 0 ~ 2 cm 底泥中 NaOH-P 平均值为 186  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,由高到低的顺序为小南湖、茅家埠、西里湖、外湖南、岳湖、北里湖、外湖中、外湖北,与总磷含量的高低顺序基本一致.

3 次调查时西湖的水质状况如表 2. 调查期间春季平均水温为 19.7 $^{\circ}\text{C}$ ,夏季平均水温 29.8 $^{\circ}\text{C}$ ,冬季平均水温 8.8 $^{\circ}\text{C}$ ,水温的季节代表性较好. 调查期间大部分水体不存在厌氧情况,但是 7 月夏季调查时北里湖、岳湖底层溶解氧饱和度低于 80%,出现了轻度缺氧. pH 基本维持弱碱性,其中夏季调查是北部湖区的几个点位 pH 甚至超过了 9,与藻类密度偏高有关. 反映藻类生物量的 Chl 指标呈现明显的季节变化:春季平均值为 8.6  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,夏季为 17.8  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而冬季为 6.0  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 特别是外湖和北里湖,夏季这两个区域的 Chl 平均值为 28.0  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,对应的湖泊营养状态指数(TLI)为 61,呈现明显的富营养状况. 春、夏、冬季 EC 平均值分别为 239、181、241  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,空间上也表现出差异,冬春季外湖、北里湖明显偏高,这主要与污染程度有关,污染程度高的湖区、水体交换差季节和区

表 2 西湖上覆水水质的季节变化

Table 2 Seasonal variations of water quality in overlying water of West Lake

季节	点位	T / $^{\circ}\text{C}$	pH	DO /%	EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SRP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SD / $\text{cm}$	Chl / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
春	XH1	18.6	7.03	79	230	0.025	0.010	3.742	190	1.7
春	XH3	19.0	7.39	112	232	0.026	0.003	3.334	170	4.0
春	XH4	19.9	7.80	105	225	0.019	0.002	3.012	160	4.6
春	XH5	18.8	7.65	96	245	0.023	0.002	3.079	110	10.3
春	XH6	18.8	8.63	106	248	0.020	0.002	2.828	80	17.6
春	XH7	19.0	8.09	102	246	0.024	0.003	2.829	95	14.2
春	XH8	19.7	7.80	102	253	0.038	0.003	2.609	85	11.5
春	XH9	20.0	8.15	98	230	0.019	0.003	2.898	140	4.8
夏	XH1	25.3	7.82	91	185	0.059	0.005	4.879	130	2.5
夏	XH3	28.1	7.96	98	219	0.047	0.003	4.538	90	12.7
夏	XH4	30.4	8.13	105	183	0.036	0.003	4.325	110	9.1
夏	XH5	29.7	9.15	103	170	0.032	0.002	4.213	65	20.4
夏	XH6	30.0	9.31	98	170	0.029	0.004	3.796	50	36.2
夏	XH7	30.0	9.61	119	170	0.030	0.015	3.674	45	29.2
夏	XH8	30.5	9.35	107	166	0.049	0.005	3.257	50	26.0
夏	XH9	30.9	7.86	83	182	0.031	0.009	3.003	100	6.5
冬	XH1	9.6	8.40	99	233	0.044	0.005	2.714	215	1.0
冬	XH3	9.5	8.96	102	248	0.032	0.004	2.828	200	3.3
冬	XH4	8.7	8.87	100	249	0.020	0.003	2.628	200	3.6
冬	XH5	8.7	8.82	93	240	0.030	0.002	2.133	140	5.6
冬	XH6	8.4	8.88	92	239	0.023	0.002	1.969	100	9.0
冬	XH7	8.4	8.92	90	237	0.020	0.002	1.851	112	7.1
冬	XH8	8.5	8.93	94	236	0.034	0.002	1.941	100	12.5
冬	XH9	8.7	8.91	102	248	0.028	0.002	2.616	160	5.6

域,离子强度偏高。

特别值得关注的是西湖的氮污染。监测表明西湖的氮污染比较严重,春、夏、冬季的平均值分别为 3.04、3.96、2.34  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,均处于劣五类,且夏季污染更重。引水入湖区的氮含量显著高于其他区域,反映出引水工程本身对西湖氮的影响较大,这与金赞芳等人 2012 ~ 2013 对外源负荷调查分析的结果一致<sup>[20]</sup>。

西湖水体总磷基本处于 II 类与 III 类之间,春、夏、冬季全湖总磷平均值分别为 0.024、0.039、0.029  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,夏季高出冬春季近 50%,呈现出明显的内源释放效应。

## 2.2 磷的内源释放通量

春、夏、冬这 3 季 8 个点位磷的释放通量情况如图 2。从中可以看出,夏季的释放通量显著高于冬、春季节;夏季 8 个点位磷的平均释放通量为 3.29  $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,而春季平均释放通量为 0.29  $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,冬季为 0.13  $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,季节上比较,释放通量为夏季 $\gg$ 春季 $>$ 冬季,夏季是冬、春季节的 10 倍以上。从表 2 的水体理化状况看,夏季磷的释放通量显著增高的主要因素可能是温度。而差异如此之大,则可能与西湖底泥高有机质含量的“香灰土”特征有关。

从不同点位的差异看,不同湖区底泥磷的释放通量差异也很大。夏季 8 个点位的磷释放通量最低的只有 0.54  $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,位于小南湖;最高的则达 6.06  $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,来自岳湖,二者相差也达 10 倍。夏季总体的释放强度高低的顺序为 XH9  $>$  XH4  $>$  XH5  $>$  XH6  $>$  XH7  $>$  XH8  $>$  XH3  $>$  XH1。

对照表 1 可以看出,磷的释放强度高与底泥磷含量、有效态磷含量的关系并不密切。反而与底泥有机质含量关系更大。这说明西湖磷释放的空间差异受底泥有机质分解强度的影响大于底泥活性磷储备的影响。温度、厌氧程度等释放条件对底泥磷的释放强度影响很大。有机质污染越重,高温期间

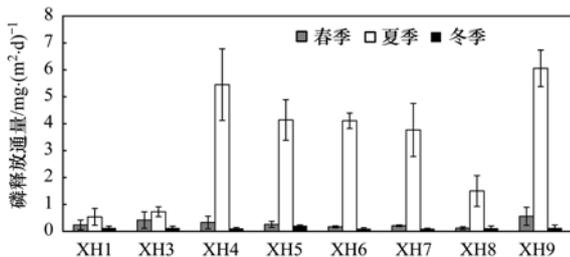


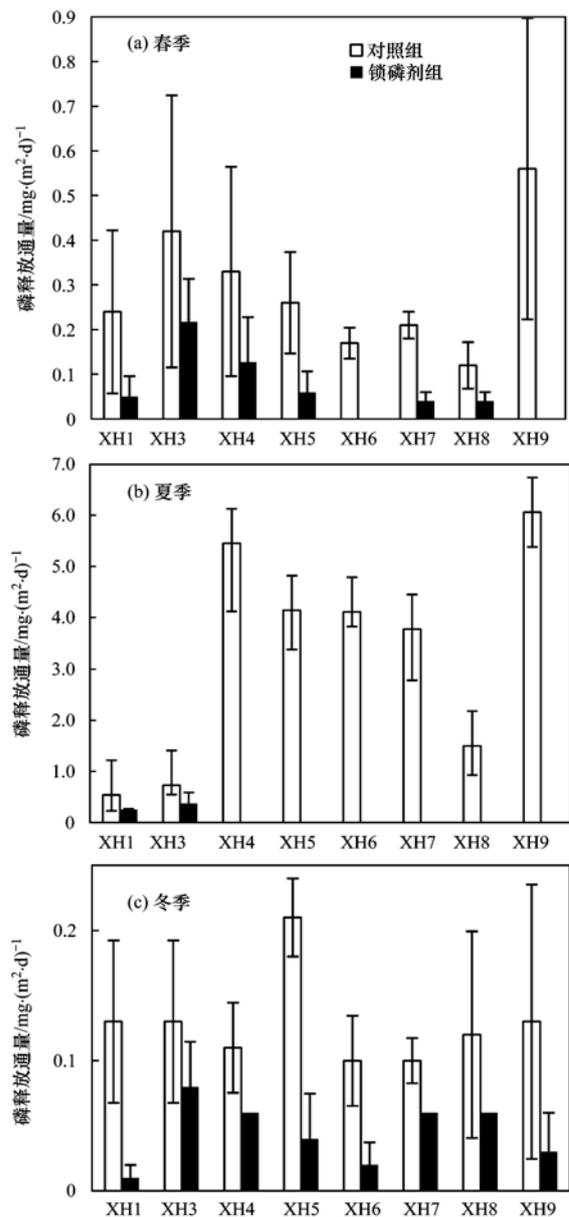
图 2 不同季节磷释放通量

Fig. 2 Phosphorus release flux at different sites in different seasons

分解耗氧的情况也越严重,促进了蓄积在底泥中磷的释放。从这个角度看,西湖底泥磷释放的污染控制也与有机质污染的控制密切联系。岳湖的情况比较特殊,有机质含量不是很高,但是磷释放强度却很高,这可能与岳湖水面很小,而周边人类活动强度又特别大有关。岳湖是“西湖印象”的表演区,游客密度很大,环湖餐饮较多,对表层底泥有机质的成分可能有影响。

## 2.3 锁磷剂的控制效果

将对照组与添加锁磷剂组的释放通量放在一起比较,结果如图 3。从中可以看出,不同季节、不同



(a) 春季; (b) 夏季; (c) 冬季

图 3 锁磷剂对西湖底泥磷释放通量的影响

Fig. 3 Influence of Phoslock application on sediment phosphorus release in West Lake

湖区,在添加了锁磷剂之后,底泥磷的释放通量都有明显降低;夏季平均释放通量由  $3.29 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$  控制在  $0.08 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$  以下,控制率达到 98%,特别是释放通量较高的几个样点,投加锁磷剂之后水体 DRP 基本测不出;在释放强度较低的春季,磷的平均释放通量由  $0.29 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$  降到  $0.07 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,控制率也达 76%;在释放强度最低的冬季,添加了锁磷剂之后,平均磷释放通量也由  $0.13 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$  降到  $0.05 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,控制率也达 62%. 也就是说,总体上看,3 个季节锁磷剂投放之后,均能将磷的释放通量控制在  $0.10 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$  以下.

### 3 讨论

#### 3.1 西湖底泥磷的内源释放强度

杭州西湖水体的磷含量,在 30 年的不断治理下,呈现缓慢下降的趋势,特别是治理后期的下降趋势变慢:1979~1980 年,外湖 TP 为  $0.165 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,外湖、北里湖、西里湖、岳湖平均值为  $0.150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [21];1981 年春季发生黑水事件期间,外湖 TP 含量甚至达到  $0.261 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [22],同时 1981 年 2 月就开始对清波门入湖污水管道实施截污;在一系列截污之后,1985~1986 年调查时,外湖、北里湖、西里湖、岳湖的总磷平均值降为  $0.122 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [21];1986 年 9 月钱塘江引水工程实施之后,1988~1989 年调查显示全湖 TP 平均值为  $0.131 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其中外湖为  $0.134 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [2];1999

年,西湖水体 TP 含量仍为  $0.123 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [3],这反映出引水对水体磷污染控制作用有限;2003 年西湖大规模疏浚工程实施之后,水体总磷含量降为  $0.087 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [3],这反映出西湖底泥内源污染对水体磷含量的影响是非常重要的,也与 Pei 等[8]的数值模拟结果结论一致;2006~2007 年调查时仍为  $0.087 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [23];之后疏浚的生态效益持续发挥,2007~2010 年外湖等几个主要湖区的 TP 含量都在  $0.05\sim 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间[24];截止到 2013 年,外湖平均值为  $0.046 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [4]. 而本研究调查中发现夏季西湖水体 TP 平均值为  $0.039 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其中小南湖达到  $0.059 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,北里湖达到  $0.049 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,仍处于富营养化水平. 从治理和水体磷变化的历史看,内源问题仍是限制西湖磷含量进一步下降的关键.

本研究对西湖底泥磷释放通量的估算结果与相关报道有所差异,但总体一致:吴根福等[25]在 1995 年 4 月测定西湖底泥的内源释放通量为  $3.49 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,总体较本研究估算值高,与本研究夏季的释放通量接近;刘静静等[26]对北里湖四季的内源通量调查发现夏季北里湖内源磷释放通量为  $0.518 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,春季为  $0.340 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,夏、春、秋、冬释放通量依次降低,与本研究的春季结果相似,但夏季显著偏低. 依照本次调查结果,结合 8 个点位所代表湖区的面积,按照春(秋)季 183 d、夏季 92 d、冬季 90 d 计,可以估算出西湖底泥磷的释放通量,如表 3 所示.

表 3 西湖底泥磷的内源释放通量估算

Table 3 Estimation of phosphorus internal loading from sediments in West Lake

点位	XH1	XH3	XH4	XH5	XH6	XH7	XH8	XH9
代表面积/ $\text{km}^2$	0.20	0.33	0.78	0.90	2.23	1.33	0.35	0.11
春季速率/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	0.24	0.42	0.33	0.26	0.17	0.21	0.12	0.56
春季通量/ $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$	0.048 0	0.138 6	0.257 4	0.234 0	0.379 1	0.279 3	0.042 0	0.061 6
夏季速率/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	0.54	0.73	5.45	4.14	4.11	3.77	1.50	6.06
夏季通量/ $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$	0.108 0	0.240 9	4.251 0	3.726 0	9.165 3	5.014 1	0.525 0	0.666 6
冬季速率/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	0.13	0.13	0.11	0.21	0.10	0.10	0.12	0.13
冬季通量/ $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$	0.026 0	0.042 9	0.085 8	0.189 0	0.223 0	0.133 0	0.042 0	0.014 3
年负荷/kg	21.06	51.39	445.92	402.62	932.65	524.38	59.77	73.89
湖年负荷/t	2.51							

从表 3 可知,根据本实验结果估算,目前西湖每年全湖磷的内源负荷大约是 2.51 t. 这一结果与吴根福在 1995 年西湖底泥疏浚前估算的 7.22 t 相比[25],下降了 65%. 但是这一释放量仍较高,如果按照西湖水量 1429 万  $\text{m}^3$  计算,2.51 t 的释放量将导致上覆水 TP 的平均增量为  $0.176 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 考虑

到目前西湖日引水 40 万  $\text{m}^3$ 、年引水 14600 万  $\text{m}^3$  的状况,这一浓度效应可能因引水而降低,但对水体的磷效应增量仍可达  $0.016 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 此外,据 Jin 等[20]在 2012~2013 年的调查表明,每年西湖的外源入湖磷负荷为 8.2 t,出湖年负荷为 7.1 t,滞留量为 1.1 t. 如此看,2.51 t 的内源负荷还是比较高的.

而由于底泥磷释放状况在空间上的不均,局部湖湾的释放更加严重.因此,西湖底泥磷释放的深度控制还是很必要的.

### 3.2 锁磷剂在西湖应用的可能性

锁磷剂已经在不同类型的水体进行过实验,表现出较高的环境条件适应性:包括早期在澳大利亚一个 TP 为  $0.330 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的河流中<sup>[9]</sup>,在英国 Flemington 湖中<sup>[27]</sup>,甚至在厌氧条件下<sup>[28]</sup>,以及在污水中<sup>[29]</sup>,Phoslock® 都展现出很高的固磷稳定性.但也有不是很成功的例子,如荷兰的一个水塘中<sup>[30]</sup>,但其原因是受大量鸟类排泄物磷补给影响,这方面的情况在西湖并不存在,而且在他们另外一篇关于锁磷剂控磷效果的文章中,也推荐锁磷剂是一种较为适合的控磷材料<sup>[11]</sup>.因此,就底泥固磷试剂而言,锁磷剂应当是值得尝试的产品.在我国,Phoslock® 也先后在滇池、太湖和长广溪进行了初步实验,均表现出较好的控磷效果<sup>[12,15,31]</sup>.锁磷剂应用的不利方面包括可能引发镉毒害、因板结破坏水土界面微生物活性等,但是近期经过中国环科院等相关部门的毒性评估表明,锁磷剂的毒性很低,不会对水体产生危害.

作为一个“香灰土”底质的浅水湖泊,西湖底泥的磷释放潜力不小,特别是温度较高的时候,因此对于内源磷进行进一步控制还是很有必要的.进行沉水植被恢复能够有效提高水体透明度,大大减少底层厌氧的发生,从而控制底泥磷释放.但是在沉水植被恢复初期,需要控制水体浮游藻类的生物量,从而有效提升水体透明度,保障沉水植被的稳定恢复.此时,采用锁磷剂能够在几个月的时间内显著降低水体磷水平,给沉水植物以发展的机会,将明显提升生态修复的成功率.因此,在西湖的一些湖湾实施锁磷剂控磷是可能的.

Ross 等<sup>[28]</sup>在英国 Flemington 湖实验时,建议在有氧条件下锁磷剂的投放量为  $170 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,缺氧条件下  $510 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,即可有效控制磷释放.鉴于西湖地处亚热带地区,以及高有机质本底,本实验的投放量更为保守,为  $630 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ .从表 1 可知,西湖表层底泥中有效磷的含量约为  $110 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,目前锁磷剂的推荐剂量为有效磷的 100 倍.按此有效磷含量估算,每平方米的锁磷剂投放量为  $600.6 \text{ g}$ (底泥平均含水率为 71% (表 1),固体物质的比重按照  $2.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  计).初步估算一次投放的费用大约为  $4.3 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-2}$ .以内源污染较为严重的北里湖为例,投放一次的费用大约为 140 万元.随着锁磷剂的生产成

本调整,这一投资还可能下降.这对于已经进行了 30 多年高强度富营养化治理的西湖而言,是有望接受的.

## 4 结论

(1)西湖底泥有机质含量高,底泥磷释放呈现较大的季节差异,夏天底泥磷释放通量平均达  $3.29 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ,是春季、冬季释放量的 10 倍以上,对湖水磷含量产生明显影响,总体估算西湖底泥年释放量达 2.51 t.

(2)室内泥柱培养实验结果表明,锁磷剂对西湖底泥各个湖区的底泥磷内源释放均有明显的控制效果,能将上覆水溶解性活性磷控制在  $0.010 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,春、夏、冬季的底泥磷释放控制率分别为 76%、98%、62%.特别是在磷释放速率较高的夏季,控制效果十分明显.

(3)控制内源释放是解决西湖磷问题的关键.本研究表明,即便是有机质含量较高的西湖底泥,锁磷剂对其控磷效果也很显著.在西湖的富营养化治理中,可以考虑在一些生态修复关键区施用.

致谢:杭州市西湖水域管理处在样品采集方面提供了大力帮助,李枫博士、薛静琛实验员协助了样品处理及水质分析,风斯乐(上海)水治理技术有限公司提供了锁磷剂产品,在此一并表示感谢.

### 参考文献:

- [1] Ding J T, Cao J L, Xu Q G, *et al.* Spatial heterogeneity of lake eutrophication caused by physiogeographic conditions: an analysis of 143 lakes in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **30**: 140-147.
- [2] 陆开宏,姚礼一,周少勤,等.杭州西湖引流冲污前后浮游藻类变化及防治富营养化效果评价[J]. *应用生态学报*, 1992, **3**(3): 266-272.  
Lu K H, Yao L Y, Zhou S Q, *et al.* Population variation of phytoplankton in West Lake of Hangzhou before and after diluting sewages with erupting into river water and effect of controlling eutrophication[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, **3**(3): 266-272.
- [3] 吴芝瑛,虞左明,盛海燕,等.杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(3): 277-284.  
Wu Z Y, Yu Z M, Sheng H Y, *et al.* Ecological effects of the dredging in the West Lake, Hangzhou [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(3): 277-284.
- [4] 尤爱菊,吴芝瑛,韩曾萃,等.引水等综合整治后杭州西湖氮、磷营养盐时空变化(1985~2013年)[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(3): 371-377.  
You A J, Wu Z Y, Han Z C, *et al.* Spatial and temporal distributions and variations of nutrients in the West Lake, Hangzhou after the implementation of integrated water management program (1985-2013) [J]. *Journal of Lake*

- Sciences, 2015, **27**(3): 371-377.
- [ 5 ] 李静, 朱广伟, 朱梦圆, 等. 杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2038-2044.  
Li J, Zhu G W, Zhu M Y, *et al.* Composition and environmental effects of LFOM and HFOM in “incense-ash” sediments of West Lake, Hangzhou, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2038-2044.
- [ 6 ] 李震宇, 朱荫涓. 西湖沉积物有机质特征[J]. 环境化学, 1999, **18**(2): 122-126.  
Li Z Y, Zhu Y M. Characteristics of sediment in West Lake[J]. Environmental Chemistry, 1999, **18**(2): 122-126.
- [ 7 ] 徐骏. 杭州西湖底泥磷分级分布[J]. 湖泊科学, 2001, **13**(3): 247-254.  
Xu J. Profiles of phosphorus fractions in the sediments of West Lake, Hangzhou[J]. Journal of Lake Sciences, 2001, **13**(3): 247-254.
- [ 8 ] Pei H P, Ma J Y. Study on the algal dynamic model for West Lake, Hangzhou[J]. Ecological Modelling, 2002, **148**(1): 67-77.
- [ 9 ] Robb M, Greenop B, Goss Z, *et al.* Application of phoslock™, an innovative phosphorus binding clay, to two Western Australian waterways: preliminary findings[J]. Hydrobiologia, 2003, **494**(1-3): 237-243.
- [ 10 ] Meis S, Spears B M, Maberly S C, *et al.* Sediment amendment with Phoslock® in Clatto Reservoir (Dundee, UK): investigating changes in sediment elemental composition and phosphorus fractionation [J]. Journal of Environmental Management, 2012, **93**(1): 185-193.
- [ 11 ] van Oosterhout F, Lüring M. The effect of phosphorus binding clay (Phoslock®) in mitigating cyanobacterial nuisance: a laboratory study on the effects on water quality variables and plankton[J]. Hydrobiologia, 2013, **710**(1): 265-277.
- [ 12 ] 余先旭, 孙珮石, 朱宝平, 等. 锁磷剂(Phoslock)对滇池水体的除磷试验研究[J]. 贵州环保科技, 2006, **12**(1): 6-9.  
Yu X X, Sun P S, Zhu B P, *et al.* Experimental research on effect of phosphorus removal of Phoslock in Lake Dianchi[J]. Environmental Protection Science and Technology of Guizhou, 2006, **12**(1): 6-9.
- [ 13 ] 王秀朵, 张大群, 刘瑶, 等. 锁磷剂用于富营养化水体除磷的研究[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(23): 88-90.  
Wang X D, Zhang D Q, Liu Y, *et al.* Study on removal of phosphorus from eutrophic water using Phoslock [J]. China Water & Wastewater, 2010, **26**(23): 88-90.
- [ 14 ] 张大群, 刘瑶, 金宏, 等. 锁磷剂微生物菌剂复合技术用于富营养水体治理的研究[J]. 给水排水, 2011, **36**(11): 144-147.  
Zhang D Q, Liu Y, Jin H, *et al.* Study on the Phoslock-microbial agents bonding technology to treat eutrophic water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, **36**(11): 144-147.
- [ 15 ] 李静, 朱广伟, 张晓松, 等. 锁磷剂及覆盖技术对长广溪不同污染类型河段底泥磷释放的控制效果[J]. 环境化学, 2015, **34**(2): 358-366.  
Li J, Zhu G W, Zhang X S, *et al.* Control effect of Phoslock and sand-capping on sediment phosphorus release in different polluted sections of Changguangxi River[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(2): 358-366.
- [ 16 ] Cowan J L W, Boynton W R. Sediment-water oxygen and nutrient exchanges along the longitudinal axis of Chesapeake Bay: seasonal patterns, controlling factors and ecological significance [J]. Estuaries, 1996, **19**(3): 562-580.
- [ 17 ] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.  
Chen Y W, Chen K N, Hu Y H. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(5): 550-552.
- [ 18 ] 朱梦圆, 朱广伟, 钱君龙, 等. SMT 法插标分析沉积物中磷的地球化学形态[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(8): 1502-1507.  
Zhu M Y, Zhu G W, Qian J L, *et al.* SMT method for geochemical phosphorus fraction analysis in sediment by reference material inserting[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(8): 1502-1507.
- [ 19 ] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, *et al.* Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. Environmental Pollution, 2013, **173**: 216-223.
- [ 20 ] Jin Z F, Chen L X, Li F L, *et al.* Effects of water transfer on water quality and estimation of the pollutant fluxes from different sources into West Lake, Hangzhou City, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(3): 1091-1101.
- [ 21 ] 李梅姿, 夏建文, 宁修仁, 等. 西湖引水前水体质量调查与评价[J]. 环境污染与防治, 1988, **10**(4): 28-34.  
Li M Z, Xia J W, Ning X R, *et al.* Investigation and evaluation of water quality of West Lake before dilution engineering [J]. Environmental Pollution & Control, 1988, **10**(4): 28-34.
- [ 22 ] 项斯端. 西湖藻量动态及其超富营养化生态系统[J]. 杭州大学学报, 1983, **10**(S): 89-94.  
Xiang S R. Variation of phytoplankton biomass and the hyper-eutrophication ecosystem of West Lake[J]. Journal of Hangzhou University, 1983, **10**(S): 89-94.
- [ 23 ] 毛成责, 余雪芳, 邵晓阳. 杭州西湖总氮、总磷周年变化与水体富营养化研究[J]. 水生生态学杂志, 2010, **3**(4): 1-7.  
Mao C Z, Yu X F, Shao X Y. Study on the annual variations of TN and TP and the eutrophication in Hangzhou West Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2010, **3**(4): 1-7.
- [ 24 ] 饶利华, 吴芝瑛, 徐骏, 等. 杭州西湖轮虫的群落结构及与水体环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 138-146.  
Rao L H, Wu Z Y, Xu J, *et al.* Relationship between environmental factors of the water and rotifer community structure in West Lake, Hangzhou[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(1): 138-146.
- [ 25 ] 吴根福, 吴学昌, 金承涛, 等. 杭州西湖底泥释磷的初步研究[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(2): 107-110.  
Wu G F, Wu X C, Jin C T, *et al.* Preliminary studies on release of phosphorus from the sediment of West Lake, Hangzhou [J]. China Environmental Science, 1998, **18**(2): 107-110.
- [ 26 ] 刘静静, 董春颖, 宋英琦, 等. 杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算[J]. 生态学报, 2012, **32**(24): 7932-7939.  
Liu J J, Dong C Y, Song Y Q, *et al.* The seasonal variations of

- nitrogen and phosphorus release and its fluxes from the sediments of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(24): 7932-7939.
- [27] Meis S, Spears B M, Maberly S C, *et al.* Assessing the mode of action of Phoslock<sup>®</sup> in the control of phosphorus release from the bed sediments in a shallow lake (Loch Flemington, UK) [J]. *Water Research*, 2013, **47**(13): 4460-4473.
- [28] Ross G, Haghseresht F, Cloete T E. The effect of pH and anoxia on the performance of Phoslock<sup>®</sup>, a phosphorus binding clay [J]. *Harmful Algae*, 2008, **7**(4): 545-550.
- [29] Haghseresht F, Wang S B, Do D D. A novel lanthanum-modified bentonite, Phoslock, for phosphate removal from wastewaters [J]. *Applied Clay Science*, 2009, **46**(4): 369-375.
- [30] Lüring M, van Oosterhout F. Case study on the efficacy of a lanthanum-enriched clay (Phoslock<sup>®</sup>) in controlling eutrophication in Lake Het Groene Eiland (The Netherlands) [J]. *Hydrobiologia*, 2013, **710**(1): 253-263.
- [31] Ding Y Q, Qin B Q, Xu H, *et al.* Comparison of efficacy of two P-inactivation agents on sediments from different regions of Lake Taihu: sediment core incubations[J]. *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, 2012, **181**(4): 271-281.

---

## 《环境科学》连续 5 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2016 年 11 月 22 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2016 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》再获“2016 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 5 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

## CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City .....	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>10</sub> During Spring and Summer of Lanzhou .....	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan .....	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> in PM <sub>2.5</sub> and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing .....	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing .....	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM <sub>2.5</sub> ) of Beijing and Baoding .....	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data .....	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals .....	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project .....	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir .....	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares .....	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer .....	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors .....	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohé River Through High-throughput Sequencing .....	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay .....	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface .....	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland .....	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake .....	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China .....	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water .....	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate .....	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> .....	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride .....	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water .....	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes .....	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes .....	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater .....	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment .....	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process .....	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor .....	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor .....	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills .....	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse .....	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou .....	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure .....	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong .....	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain .....	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil .....	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil .....	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil .....	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N <sub>2</sub> O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism .....	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO <sub>2</sub> Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes .....	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil .....	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels .....	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism .....	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings .....	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize .....	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area .....	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing .....	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing .....	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode .....	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States .....	RONG Yue (1726)