

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算

潘延安^{1,2}, 雷沛², 张洪^{2*}, 单保庆², 李杰¹

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 采集重庆园博园龙景湖不同区域沉积物样柱, 分析沉积物上覆水和孔隙水中氮磷垂直分布特征, 并利用一维孔隙水扩散模型(Fick定律)来估算氨氮和正磷酸盐的扩散通量和年负荷贡献量。结果表明, 龙景湖沉积物-水界面氨氮从上覆水到孔隙水在垂直剖面上总体都呈现出增大趋势; 表层(0~5 cm)沉积物孔隙水中氨氮平均浓度为 $6.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 3.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是上覆水氨氮平均含量10倍。正磷酸盐垂直分布特征总体表现为先增大再减小, 在表层孔隙水出现极大值; 沉积物孔隙水中正磷酸盐平均浓度为 $2.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 1.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。所有区域氨氮均表现为由沉积物向上覆水释放, 新增淹没区库湾区域氨氮扩散通量低于 $6.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 龙景沟水库、龙景湖主湖原有湖区氨氮扩散通量分别高达 $47.19 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $40.29 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。原有湖区正磷酸盐表现为由沉积物向上覆水释放, 扩散通量仍以龙景湖主湖及龙景沟水库最大, 为 $7.89 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $6.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。新增淹没区的河道、库湾及赵家溪部分区域正磷酸盐却表现为由上覆水向沉积物中扩散, 扩散通量为 $-1.93 \sim -2.78 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。整个湖区氨氮年负荷贡献量为 $3.95 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 新增淹没区贡献率为85%; 正磷酸盐年负荷贡献量为 $0.357 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 新增淹没区贡献率为72%。

关键词: 营养盐; 扩散通量; 沉积物-水界面; Fick定律; 孔隙水

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1727-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.013

Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period

PAN Yan-an^{1,2}, LEI Pei², ZHANG Hong², SHAN Bao-qing², LI Jie¹

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Sediment cores from a newly formed urban lake (Longjinghu Lake in China's Chongqing City) were selected to study the vertical distribution characteristics of both nitrogen and phosphorus from the overlying water to porewater, and then fluxes of ammonia (NH_4^+-N) and orthophosphate ($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$) from different areas of the lake were calculated using a one-dimensional transport-reaction model based on the Fick's First Law. The results showed that the mean ammonia concentrations in porewater of surface layers (0-5 cm) was $6.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 3.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, higher by a factor of 10 compared with that in the overlying water. While orthophosphate contents tended to increase downwards, reaching a peak in surface sediment porewater, and then decreased in downcore, with a mean concentration of $2.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 1.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Based on the porewater diffusion model, ammonia were released from sediments to overlying water, which indicated potential internal nutrient releasing risk. Although the flux of ammonia in the "initial lake area" was higher than that in the "newly submerged area", the annual load contribution from the "newly submerged area" was 85% ($3.95 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$). Similar to ammonia, orthophosphate was also released from sediments to overlying water in the "initial lake area", with the highest fluxes in the former Longjinghu Lake and Longjingou Lake Reservoir, reaching $7.89 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $6.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. However, in a portion of the "newly submerged area", orthophosphate in the overlying water was transported to the sediments, resulting in negative fluxes ranging from -1.93 to $-2.78 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. The annual load of orthophosphate from the whole sediments was $0.357 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, with 72% contributed by the "newly submerged area".

Key words: nutrients; flux; sediment-water interface; Fick's law; porewater

收稿日期: 2013-09-18; 修订日期: 2013-11-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07307-001, 2012ZX07307-002)

作者简介: 潘延安(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积物污染化学, E-mail: panyanan123@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: hongzhang@cees.ac.cn

沉积物是湖泊水体营养盐的重要“源”或“汇”,在一定环境条件下,沉积物中氮、磷营养盐会通过对流、扩散和再悬浮等方式向上覆水释放^[1,2],并可能成为湖泊水质恶化和富营养化的重要原因^[3]. 沉积物中大量溶解性物质以孔隙水作为传输媒介通过表面扩散层向上覆水扩散迁移,进而影响上覆水水质^[4];因此,孔隙水中溶解态营养盐分布特征决定着沉积物与上覆水之间营养盐交换过程,并影响着湖泊水体的化学性质和组成^[5]. 近年来,基于水资源利用和景观需求,河道片段化和湖泊水库化特征日趋明显,流态的变化不仅降低了水体自净能力,也增加了内源污染释放潜力,对于有闸坝控制的湖库尤为如此. 如 Chang 等^[6]研究发现 Feitsui 水库在初期蓄水后,其水质明显受到淹没区内源释放的影响,水体氮磷浓度要到数年后才能达到稳定;徐清等^[7]研究发现密云水库沉积物内源磷负荷对入库总量的贡献量高达 28%. 因此,认识湖泊沉积物内源营养盐释放风险特征可为湖库水体污染防治提供基础.

重庆园博园龙景湖是典型的新建城市河道型水库,也是第八届中国国际园林博览会园区主要的水体景观. 新建的龙景湖是由原龙景湖水库大坝加高蓄水而成,其上游汇入河流(赵家溪和龙景沟)均为山地城市河流. 龙景湖主湖水位较深(20~30 m),换水周期长(约 2.5 a),其水源补给主要是降雨径流. 对于此类新建湖库,由于水流滞缓导致水体自净能力减弱,如何控制原有湖泊沉积物中污染物累积以及新增淹没区底质营养盐释放导致的富营养化风险,是区域水污染控制的核心任务.

由于建设工期等因素,新建的龙景湖清库不彻底,原有湖区和新增淹没区沉积物由于形成时间、底

质类型不同,其底质沉积物呈现高度异质性,可能导致营养盐释放风险存在较大差异. 目前,国内外对于新建湖库的研究多集中于水化学组成^[8]、水体污染物特征^[9,10]、浮游动植物分布特征^[11,12]等方面,而对于内源营养盐释放风险关注较少,并且较少考虑湖区下垫面不同导致营养盐释放过程的差异^[13]. 有鉴于此,本研究于新建龙景湖形成前后不同区域采集柱状沉积物,分析沉积物孔隙水和上覆水氮磷营养盐垂直分布特征,并利用一维孔隙水扩散模型定量估算龙景湖内源氮磷扩散通量和年负荷贡献量,扩展对山地城市新建水库内源释放过程的认识,以期为此类湖库的富营养化风险防治提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

园博园位于重庆市北部新区鸳鸯辖区(图 1),是一个集自然景观和人文景观为一体的超大型城市生态公园,占地面积达 2.2 km². 龙景湖位于园博园中心,主要有赵家溪(流域面积约 15 km²)和龙景沟(流域面积约 5 km²)两条汇入河流,为园博园建设提供了足够的管理用水和丰富的景观用水.

龙景湖是园博园的核心水景观,于 2009 年由国家水利部投资开工建设,并于 2012 年建成. 新建成的龙景湖水面总面积约 0.67 km²,在园博园规划区内约 0.53 km²,总库容为 663 万 m³,调节库容为 425 万 m³,由于山地城市地形地貌特点,龙景湖原有湖区水位较深(20~30 m),换水周期长(约 2.5 a),其水源补给主要是降雨径流. 龙景湖上游流域仍处于待建期,其主要污染物是氮磷和 TSS,规划湖体水质为地表水环境质量标准 IV 类.

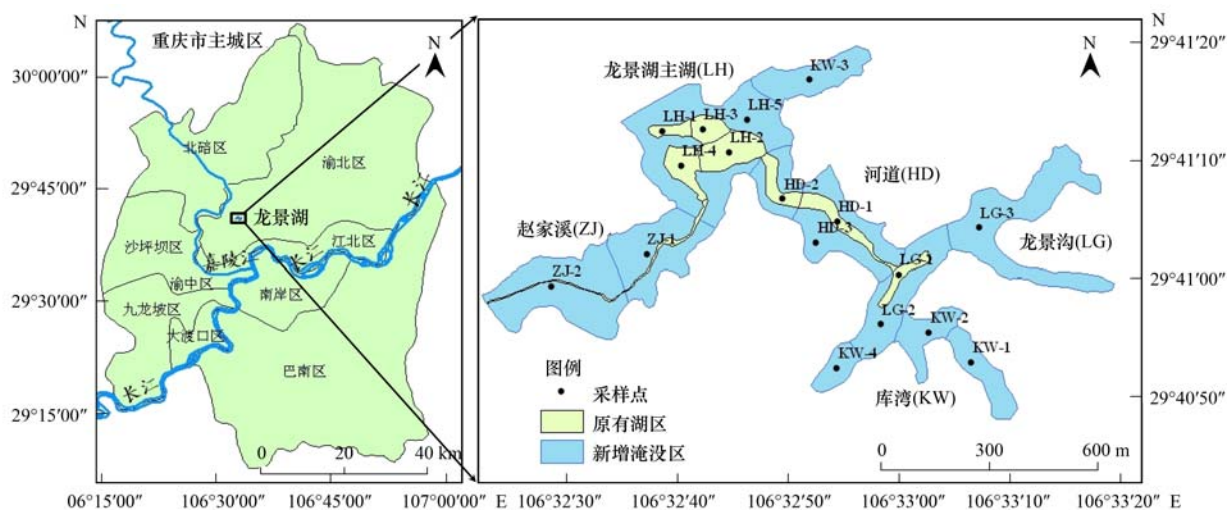


图 1 龙景湖沉积物采样点位置分布示意

Fig. 1 Distribution of sediment sampling sites in Longjing Lake

1.2 沉积物采样点布设

按照湖底沉积物形成类型不同,可将整个湖区分为两类,“原有湖区”表示园区建设之前(2010年)原有龙景湖水体区域,“新增淹没区”为龙景湖现有湖区(2013年)同“原有湖区”相比增加的区域。其中,龙景湖主湖和龙景沟水库是成库前水体沉积物和成库后颗粒物沉积底泥的混合区域,沉积物深度厚,有机质含量较高;库湾区域为施工后形成的碎石表层,有少量颗粒物沉积;河道区域(连接龙景沟与龙景湖主湖的河道)中间为成库前旧河道,有一定沉积厚度的底泥;两侧边缘区域为施工后的裸露土壤表层及碎石表层。在充分分析大坝加高前原有水库周边土地利用基础上,结合龙景湖水文、底质构型、污染状况,将龙景湖划分为5个主要区域:赵家溪(ZJ)、龙景湖主湖(LH)、河道(HD)、库湾(KW)及龙景沟(LG)。针对各区域的特点,共布设17个柱状沉积物采样点,其中,原有湖区7个,新增淹没区10个(图1)。

1.3 样品采集与分析

2013年4月15日、16日,利用自重力柱状沉积物采泥器(Corer 60, Uwitec, Austria)同时采集沉积物柱状样和上覆水。沉积物样柱采集后迅速用橡胶塞密封,然后保持竖直状态尽快运回实验室,静置24 h以消除采集和运输过程中的干扰。然后用虹吸管自上而下对上覆水按5 cm进行分层采样,采集完成后用虹吸管将上覆水小心移除;对柱状沉积物自上而下进行分割,前端0~5 cm沉积物按照每0.5 cm分层,5 cm以下按1 cm分层,直至分割完成。分层后的沉积物样品,迅速抽滤,并用0.45 μm水系微孔滤膜过滤得到孔隙水。利用全自动化学分析仪(Smart Chem 200, AMS, USA)测定分别用硫酸肼还原法、靛酚蓝分光光度法和磷钼蓝分光光度法来测定孔隙水中硝氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)及正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)浓度,每个样品重复测定3次,结果以均值表示。龙景湖采样点分布图利用ArcGIS 9.3制作;数据统计采用SPSS 16.0进行分析;数据制图利用Origin 8.0软件完成。

1.4 孔隙水扩散通量模型

采用一维孔隙水扩散模型计算孔隙水扩散通量,进而估算年污染负荷贡献。该模型假定沉积物和上覆水之间的物质交换过程为平衡状态,主要受浓度扩散控制^[14],因此其扩散通量(F)可运用Fick第一定律进行估算^[15,16]:

$$F = \varphi \times D_s \times \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

式中, F 为沉积物-水界面扩散通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; $\frac{\partial c}{\partial x}$ 为沉积物-水界面物质浓度梯度, $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$; D_s 为考虑了沉积物弯曲效应的实际分子扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 其与孔隙度之间的经验关系式^[17]: $D_s = \varphi D_0$ ($\varphi < 0.7$); $D_s = \varphi^2 D_0$ ($\varphi > 0.7$),式中 D_0 为无限稀释溶液的理想扩散系数^[18]。对于 HPO_4^{2-} , $D_0 = 6.12 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 对于 NH_4^+ -N, $D_0 = 17.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[19,20]。 φ 为沉积物孔隙度^[21],其计算方法见下式:

$$\varphi(\%) = \frac{[W_w - W_d] \times 100\%}{[W_w - W_d] + W_d/\rho} \quad (2)$$

式中, W_w 为沉积物鲜重,g; W_d 为沉积物干重,g; ρ 为表层沉积物平均密度与水密度比值,一般取2.5^[22]。

1.5 营养盐年负荷贡献量计算方法

沉积物营养盐年负荷贡献量计算方法见下式:

$$W = \sum_i^n F_i \times A_i \times 365/10^9 \quad (3)$$

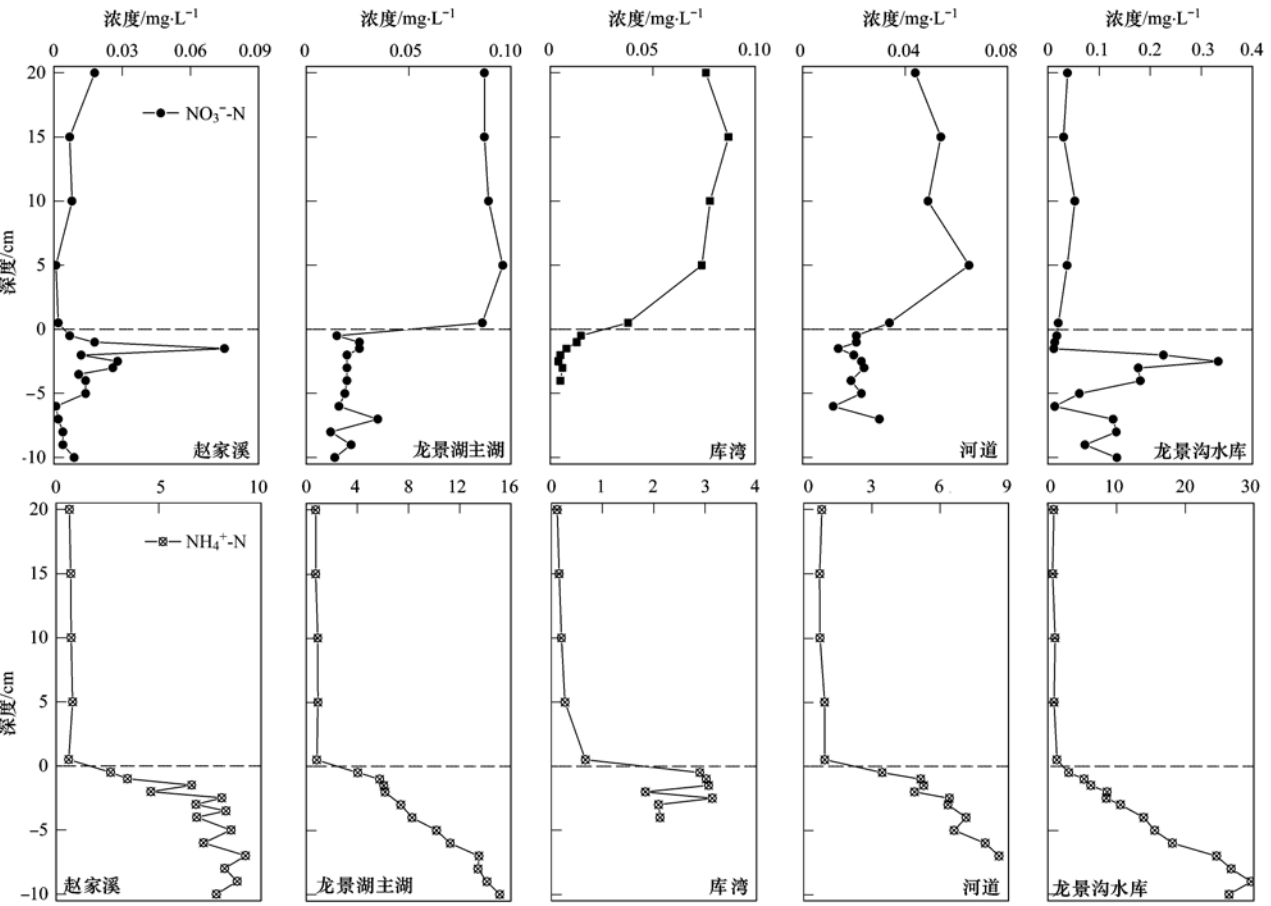
式中, W 为全湖区氮或磷的年负荷贡献量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; F_i 表示第*i*区域沉积物的扩散通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; A_i 表示第*i*区域面积, m^2 ; 10^9 为单位换算系数; 365为365 $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$,一年按365 d计算。

2 结果与讨论

2.1 沉积物-水界面氮垂直分布特征

龙景湖不同区域沉积物孔隙水和上覆水硝态氮垂直分布见图2。从上覆水到孔隙水随着沉积物深度增加,硝态氮浓度变化呈现2类不同的特征:龙景湖、库湾及河道硝态氮浓度进入沉积物-水界面后迅速降低并保持稳定,如龙景湖主湖湖区,上覆水 NO_3^- -N浓度维持在0.09 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是表层孔隙水含量4倍(表1)。在沉积物缺氧环境中,有机质被厌氧微生物分解产生大量 NH_4^+ -N,但由于受氧的限制而无法通过硝化作用将其转化为 NO_3^- -N,同时孔隙水中 NO_3^- -N会在反硝化细菌作用下被还原为 NO_2^- -N或 N_2 ^[23]。赵家溪及龙景沟水库, NO_3^- -N浓度在沉积物2 cm出现峰值,随后递减直至恢复稳定,这可能与此类区域底栖生物以及界面水动力学条件等^[24]导致沉积物近表面位置氧化还原环境和微生物硝化作用有关,可分析沉积物垂直剖面的孔隙度和氧化还原电位来做进一步验证^[25]。

龙景湖各区域上覆水和孔隙水氨氮垂直剖面上



图中水平虚线所在位置为沉积物-水界面,下同
图 2 龙景湖上覆水和孔隙水硝氮、氨氮垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in the overlying water and porewater in the sediments from Longjing Lake

表 1 龙景湖上覆水和孔隙水氮磷浓度统计¹⁾/mg·L⁻¹

Table 1 Statistics of nitrogen and phosphorus contents in the overlying water and porewater in the sediments from Longjing Lake/mg·L⁻¹

营养盐	区域名称	上覆水		表层(0~5 cm)孔隙水	
		Min~Max	Mean±S. D.	Min~Max	Mean±S. D.
NO_3^- -N	赵家溪	nd	nd (n=5)	nd~0.08	0.02±0.02 (n=14)
	龙景湖主湖	0.09~0.10	0.09±0.01 (n=5)	0.02~0.03	0.02±0.00 (n=12)
	河道	0.04~0.09	0.07±0.00 (n=5)	nd~0.19	0.07±0.08 (n=7)
	库湾	0.03~0.07	0.05±0.01 (n=5)	nd~0.02	0.02±0.00 (n=10)
	龙景沟水库	0.02~0.05	0.04±0.01 (n=5)	nd~0.33	0.13±0.12 (n=13)
NH_4^+ -N	赵家溪	0.62~0.81	0.70±0.08 (n=5)	2.65~8.53	6.22±2.15 (n=14)
	龙景湖主湖	0.75~0.93	0.83±0.08 (n=5)	4.03~10.19	6.84±1.99 (n=12)
	河道	0.11~0.67	0.28±0.22 (n=5)	1.84~3.14	2.60±0.56 (n=7)
	库湾	0.71~0.93	0.82±0.11 (n=5)	3.46~7.14	5.65±1.20 (n=10)
	龙景沟水库	0.70~1.32	0.97±0.23 (n=5)	3.05~15.59	8.98±4.27 (n=13)
PO_4^{3-} -P	赵家溪	0.16~0.23	0.20±0.03 (n=5)	0.65~2.64	1.62±0.56 (n=14)
	龙景湖主湖	0.03~0.04	0.03±0.00 (n=5)	2.44~3.65	3.22±0.38 (n=12)
	河道	0.03~0.19	0.07±0.07 (n=5)	0.09~1.04	0.39±0.36 (n=7)
	库湾	0.29~0.46	0.34±0.07 (n=5)	1.15~2.69	2.11±0.54 (n=10)
	龙景沟水库	0.11~0.74	0.28±0.26 (n=5)	1.73~3.19	2.71±0.48 (n=13)

1) Min、Max 和 Mean 分别表示浓度的最小值、最大值和平均值; S. D. 为 Standard deviations,标准偏差; n 为统计样本数; nd 表示低于检出限

总体都呈现出增大的趋势,尤其是在沉积物-水界面氨氮浓度都急剧增加(图2)。以龙景湖主湖为例,其上覆水氨氮浓度基本维持在 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进入沉积物-水界面以后,氨氮浓度增加到 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随着深度增加氨氮浓度持续增加,到界面下 10 cm 处孔隙水中氨氮浓度接近 $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。沉积物孔隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度主要与沉积物污染水平、生物作用大小、氧化还原状况及水动力影响等多种条件有关^[22]。龙景湖主湖区接受大量点源、面源负荷输入,污染相对严重,沉积物有机质丰富(表层沉积物有机质为 8.9%),表层微生物数量众多,由于生物分解作用显著而使近表层沉积物缺氧,容易形成还原环境,生物参与氨化作用较为明显,使表层孔隙水中接纳更多的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ^[26]。另一方面,表层沉积物易受扰动(支流补给带来的水底潜流、生物扰动等)可能导致部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 释放并进入上覆水体,在一定程度上降低表层沉积物孔隙水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量。底层沉积物通常缺氧程度较高,有利于高价态氮(如 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$)向 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等低价态氮转化,产生的氨氮较难被微生物全部吸收;同时由于底层沉积物受水动力扰动作用较小,比表层沉积物更有利于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在沉积物中保存,因而表层沉积物孔隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量低于底层^[27,28]。龙景湖其它区域上覆水和孔隙水中氨氮浓度分布均表现出类似特征。

对上覆水和表层($0 \sim 5 \text{ cm}$)沉积物孔隙水氨氮浓度进行统计,结果见表1。河道上覆水氨氮含量最低,仅为 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而其它区域均保持在 $0.7 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。各点表层($0 \sim 5 \text{ cm}$)沉积物孔隙水中氨氮平均浓度为 $6.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 3.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是上覆水氨氮平均含量 10 倍。表层沉积

物孔隙水氨氮平均浓度最低为河道,浓度范围为 $1.84 \sim 3.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而上覆水氨氮含量为 $0.11 \sim 0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,两者平均浓度相差近 9 倍。龙景沟水库上覆水氨氮平均浓度为 $0.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其表层沉积物孔隙水氨氮含量($3.05 \sim 15.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)也为最高。沉积物孔隙水中营养盐含量主要来源于生物死亡后的一部分碎屑、壳体分解和陆源物质溶解。受其生产和消耗之间的平衡所制约,前者取决于沉积物中有机物数量及其分解速率、陆源排污影响程度等因素,后者取决于底栖生物尤其是掘穴动物数量、界面水水动力学条件、矿化作用等因素^[5]。连接龙景沟水库和龙景湖主湖区的河道区域为人工新挖河道,形成时间短($3 \sim 4 \text{ a}$),颗粒物沉降量少,有机质含量较低,无直接外源输入,因此上覆水及孔隙水氨氮含量相对较低。而龙景沟水库为原有湖区,水深高达 10 m 以上,水流缓慢利于颗粒物沉积,有机质含量高(表层沉积物有机质达 7.7%),同时支流外源污染严重,因此孔隙水及上覆水氨氮含量相对较高。

2.2 沉积物-水界面磷垂直分布特征

龙景湖各区域沉积物孔隙水中正磷酸盐垂直分布特征总体上表现为先增大再减小,在表层孔隙水剖面上均出现极大值(图3)。以赵家溪为例,其上覆水正磷酸盐浓度维持在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,从沉积物-水界面进入到表层孔隙水中,正磷酸盐浓度大幅增加,并于水-沉积物界面下 5 cm 处出现峰值,达 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;之后随着深度的增加,正磷酸盐浓度又逐渐降低,在界面下 10 cm 后趋于稳定,基本低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。已有研究表明,沉积物中磷的释放与沉积物氧化还原条件及铁化合物密切相关,好氧环境会促进沉积物对磷的吸附,厌氧条件则有助于磷从沉

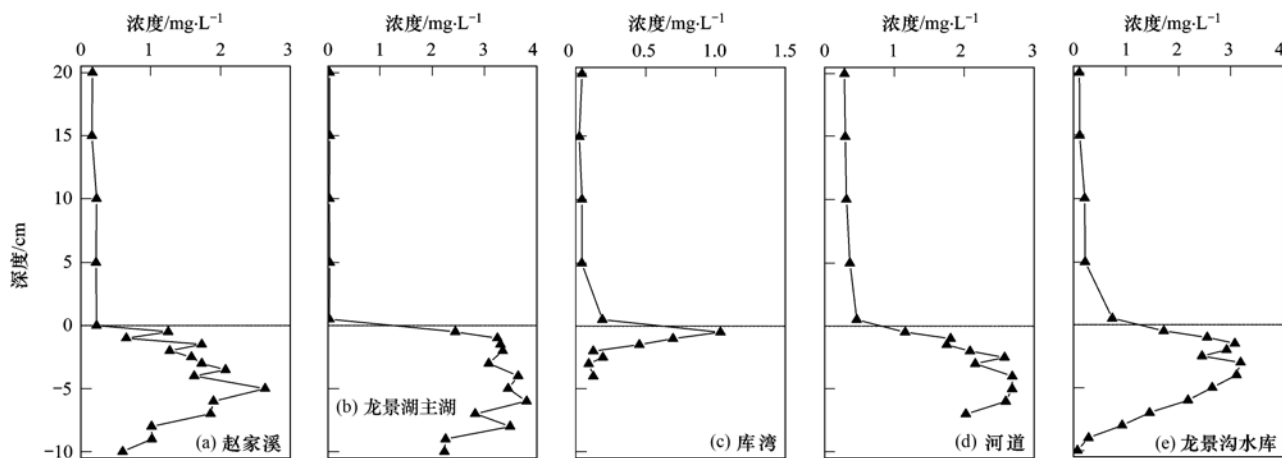


图3 龙景湖沉积物孔隙水和上覆水正磷酸盐垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ in the overlying water and pore water in the sediments from Longjing Lake

积物向孔隙水中释放. 磷酸根最有可能来自有机质厌氧降解,而沉积物中的非定型态铁的氢氧化物和氧化物对磷具有很高的吸附力^[29],因此沉积物-水界面以下的氧化带中铁氢氧化物可吸附孔隙水中的磷,从而使靠近表层水中的磷含量偏低,但到一定深度氧化条件转变为还原条件时,由于铁的氢氧化物还原作用,使可溶性磷再次溶入孔隙水中,促使孔隙水中磷浓度增高^[30].

赵家溪、库湾和龙景沟水库上覆水中正磷酸盐浓度均超过 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表1),而河道、龙景湖主湖上覆水中正磷酸盐浓度相对较低,仅为 $0.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 表层($0\sim5\text{ cm}$)孔隙水正磷酸盐浓度因采样点所处位置不同而呈现差异. 沉积物孔隙水中正磷酸盐平均浓度为 $2.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\pm1.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,是上覆水平均含量($0.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\pm0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的11倍. 最高值出现在龙景湖主湖,孔隙水中正磷酸盐为上覆水平均值近90倍;最小值为河道,孔隙水中正磷酸盐含量超过上覆水5倍,主要由于河道区域没有直接的外源输入,同时沉积物形成历史短,底质多为砂质层,沉积物吸附磷的量相对较低,从而使孔隙水中正磷酸盐含量最低^[30].

2.3 营养盐扩散通量及年负荷贡献量

在自然水体的沉积物-水界面中,由于界面上覆

水的流速极低,界面上下的物质浓度梯度引起的扩散过程是营养盐主要的迁移过程. NH_4^+-N 在沉积物-水界面扩散通量及年负荷贡献量计算结果如表2. 所有区域氨氮均表现为由沉积物向上覆水释放,即表明龙景湖水质存在潜在内源营养盐(氨氮)释放风险. 其中新增淹没区库湾区域氨氮扩散通量较低,基本低于 $6.0\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,而有明显外源污染输入的龙景沟水库、龙景湖主湖的原有湖区氨氮扩散通量较大,分别高达 $47.19\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $40.29\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,是库湾氨氮扩散通量8倍. 龙景湖各区域氨氮扩散通量大小顺序基本与沉积物污染程度相一致,由于龙景沟、赵家溪为龙景湖的主要入湖支流,其来水水质较差,而水中颗粒物在龙景沟水库、龙景湖主湖区等缓流区域沉积. 这些区域的沉积物为发黑发臭的泥炭层,有机质含量较高(表层沉积物有机质含量分别为 8.9% 、 7.7%),孔隙水中氨氮含量较高;而新增淹没区(如河道、部分库湾)沉积物形成历史短,底质多为砂质层,污染相对较轻使得孔隙水氨氮含量较低. 对氨氮的年负荷贡献量计算发现,原有湖区氨氮年负荷贡献量仅为 $0.592\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,而新增淹没区氨氮年负荷贡献量高达 $3.36\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,占整个湖区的 85% ,是内源氨氮释放的主要贡献区域,这可能与新增淹没区沉积面积占有较大比例(88%)有关.

表2 龙景湖不同区域沉积物 NH_4^+-N 扩散通量及年负荷贡献量¹⁾

Table 2 Fluxes and annual load of ammonia at different areas of Longjinghu Lake through calculations using Fick's Law

区域类别	区域名称	采样点编号	φ	$D_s\times10^6$ $/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$\partial c/\partial x$ $/\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{cm})^{-1}$	扩散通量 F $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	面积 A $/\text{m}^2$	年负荷贡献量 W $/\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$
原有湖区	龙景湖主湖(LH)	LH-1	0.918	14.8	1.084	12.75	4 191	0.020
		LH-2	0.918	14.8	2.402	28.25	16 184	0.167
		LH-3	0.918	14.8	1.390	16.35	6 954	0.041
		LH-4	0.918	14.8	3.426	40.29	10 268	0.151
	河道(HD)	HD-1	0.809	11.5	1.818	14.62	9 558	0.051
		HD-2	0.809	11.5	3.372	27.11	7 453	0.074
	龙景沟水库(LG)	LG-1	0.888	13.9	4.426	47.19	5 152	0.089
	小计	—	—	—	—	—	59 760	0.592
新增淹没区	龙景湖主湖(LH)	LH-5	0.830	12.1	3.292	28.60	78 303	0.817
	河道(HD)	HD-3	0.802	11.3	1.334	10.47	53 340	0.204
	库湾(KW)	KW-1	0.813	11.6	0.713	5.83	19 562	0.042
		KW-2	0.813	11.6	0.315	2.58	17 629	0.017
		KW-3	0.813	11.6	0.248	2.03	27 044	0.020
		KW-4	0.813	11.6	0.425	3.48	10 846	0.014
	赵家溪(ZJ)	ZJ-1	0.824	12.0	3.528	30.06	46 036	0.505
		ZJ-2	0.824	12.0	3.963	33.77	68 194	0.840
	龙景沟水库(LG)	LG-2	0.832	12.2	1.576	13.79	35 169	0.177
		LG-3	0.842	12.5	3.347	30.42	64 761	0.719
	小计	—	—	—	—	—	420 884	3.36
	合计	—	—	—	—	—	480 644	3.95

1) $\partial c/\partial x$ 和 F 数值为正表示营养盐从沉积物向上覆水扩散,为负表示由上覆水向沉积物扩散,下同

从表 3 可看出,龙景湖原有湖区沉积物-水界面正磷酸盐均表现为由沉积物向上覆水释放,龙景湖主湖及龙景沟水库的扩散通量最大,分别为 $7.89 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $6.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。而新增淹没区河道、库湾及赵家溪部分湖区正磷酸根却表现为上覆水向沉积物中扩散,扩散通量在 $-1.93 \sim -2.78 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间。这些区域水位较浅,表层沉积物受水动力扰动机会就越多,悬浮起来的表层颗粒物在富氧和较高温下,中小分子量有机物已分解至尽,以矿物构架为主的铁、硅等无机大分子胶体为其主要组成,因此具有巨大的比表面^[31]。即使当它们松软地覆盖于未扰动沉积物表面,也仍然会显示出对水体中具有阴离子特征的磷酸根产生物理甚至化学吸附^[32]。同时,该区域相对远离陆源,有机

质矿化作用较显著,无机矿物颗粒成分应有较高比例,在相对平静的环境中,表层沉积物在一定时段内对上覆水中 PO_4^{3-} 产生吸收,以致形成内汇^[31,33]。总体而言,龙景湖沉积物正磷酸盐仍表现为由沉积物向上覆水释放,正磷酸盐年负荷贡献量为 $0.357 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,其中新增淹没区年负荷贡献量为 $0.257 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,贡献率为 72%。

由表 2、表 3 可知,新增淹没区氨氮和正磷酸盐扩散通量较低,这可能与这类区域沉积物的形成历史短、接受外源输入低有关。然而,由于新增淹没区面积是原有湖区面积的 7 倍,使得新增淹没区为内源营养盐释放贡献主要的区域(新增淹没区氨氮、正磷酸盐年负荷贡献率分别为 85%、72%),其它此类城市新建景观湖泊也应重点关注这一区域。

表 3 龙景湖不同区域沉积物 PO_4^{3-} -P 扩散通量年负荷贡献量
Table 3 Fluxes and annual load of orthophosphate at different areas of Longjinghu Lake through calculations using Fick's Law

区域类别	区域名称	采样点编号	φ	$D_s \times 10^6$ / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\partial c / \partial x$ / $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$	扩散通量 F / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	面积 A / m^2	年负荷贡献量 W / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$
原有湖区	龙景湖主湖 (LH)	LH-1	0.918	5.16	1.158	4.74	4 191	0.007
		LH-2	0.918	5.16	0.963	3.94	16 184	0.023
		LH-3	0.918	5.16	1.930	7.89	6 954	0.020
		LH-4	0.918	5.16	1.614	6.60	10 268	0.025
	河道 (HD)	HD-1	0.809	4.00	0.300	0.839	9 558	0.003
		HD-2	0.809	4.00	1.306	3.65	7 453	0.010
	龙景沟水库 (LG)	LG-1	0.888	4.83	1.654	6.13	5 152	0.012
	小计	—	—	—	—	—	59 760	0.100
新增淹没区	龙景湖主湖 (LH)	LH-5	0.830	4.21	1.404	4.24	78 303	0.121
	河道 (HD)	HD-3	0.802	3.94	-1.018	-2.78	53 340	-0.020
	库湾 (KW)	KW-1	0.813	4.05	0.743	2.11	19 562	0.015
		KW-2	0.813	4.05	0.210	0.597	17 629	0.004
		KW-3	0.813	4.05	-0.678	-1.93	27 044	-0.019
		KW-4	0.813	4.05	0.477	1.36	10 846	0.005
	赵家溪 (ZJ)	ZJ-1	0.824	4.16	-0.842	-2.50	46 036	-0.042
		ZJ-2	0.824	4.16	0.480	1.42	68 194	0.035
	龙景沟水库 (LG)	LG-2	0.832	4.23	1.025	3.12	35 169	0.040
		LG-3	0.842	4.05	1.564	4.94	64 761	0.117
	小计	—	—	—	—	—	420 884	0.257
	合计	—	—	—	—	—	480 644	0.357

3 结论

- (1) 龙景湖沉积物-水界面氨氮在垂直剖面上呈现增大趋势;表层孔隙中氨氮浓度为 $6.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 3.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是上覆水平均含量的 10 倍。正磷酸盐垂直分布为先增大再减小,孔隙水中正磷酸盐浓度为 $2.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 1.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是上覆水平均含量 11 倍。
- (2) 所有区域沉积物氨氮均表现为由沉积物向上覆水释放。新增淹没区库湾氨氮扩散通量低于

- $6.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,原有湖区龙景沟水库氨氮扩散通量高达 $47.19 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。原有湖区正磷酸盐表现为由沉积物向上覆水释放,扩散通量仍以龙景湖主湖最大,为 $7.89 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。而新增淹没区河道、库湾正磷酸盐为上覆水向沉积物扩散,扩散通量为 $-1.93 \sim -2.78 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。
- (3) 整个湖区氨氮年负荷贡献量为 $3.95 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,新增淹没区贡献率为 85%;正磷酸盐年负荷贡献量为 $0.357 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,新增淹没区贡献率为 72%。

参考文献:

- [1] 陈超, 钟继承, 范成新, 等. 湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3872-3878.
- [2] Jeppesen E, Søndergaard M, Jensen J P, *et al.* Lake responses to reduced nutrient loading—an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies [J]. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(10): 1747-1771.
- [3] 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.
- [4] Frindte K, Eckert W, Attermeyer K, *et al.* Internal wave-induced redox shifts affect biogeochemistry and microbial activity in sediments: a simulation experiment [J]. *Biogeochemistry*, 2013, **113**(1-3): 423-434.
- [5] 刘碧波, 丰民义, 刘剑彤. 东湖典型区域间隙水中营养盐的时空分布[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(8): 979-986.
- [6] Chang S P, Wen C G. Changes in water quality in the newly impounded subtropical Feitsui Reservoir, Taiwan[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, **33**(2): 343-357.
- [7] 徐清, 刘晓端, 王辉锋, 等. 密云水库沉积物内源磷负荷的研究[J]. 中国科学(D辑), 2005, **35**(Z1): 281-287.
- [8] Thapanand T, Jutagatee T, Wongrat P, *et al.* Trophic relationships and ecosystem characteristics in a newly-impounded man-made lake in Thailand [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2009, **16**(2): 77-87.
- [9] 喻元秀, 汪福顺, 王宝利, 等. 溶解无机碳及其同位素组成特征对初期水库过程的响应——以新建水库(洪家渡)为例[J]. 矿物学报, 2009, **29**(2): 268-274.
- [10] Yao H, Feng X B, Guo Y N, *et al.* Mercury and methylmercury concentrations in two newly constructed reservoirs in the Wujiang River, Guizhou, China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, **30**(3): 530-537.
- [11] 林秋奇, 赵帅营, 韩博平. 新建水库轮虫和甲壳类浮游动物动态特征[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(3): 270-276.
- [12] 李莹, 肖利娟, 林秋奇, 等. 一座新建水库——广东剑潭水库浮游植物动态特征[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 227-234.
- [13] Sakurai Y, Haruta S. Characteristics of sediments in a newly constructed reservoir in Japan[J]. *Water Science & Technology*, 2006, **53**(2): 73-78.
- [14] Müller B, Wang Y, Dittrich M, *et al.* Influence of organic carbon decomposition on calcite dissolution in surficial sediments of a freshwater lake [J]. *Water Research*, 2003, **37**(18): 4524-4532.
- [15] Lavery P S, Oldham C E, Ghisalberti M. The use of Fick's First Law for predicting porewater nutrient fluxes under diffusive conditions [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(13): 2435-2451.
- [16] Kuwae T, Kibe E, Nakamura Y. Effect of emersion and immersion on the porewater nutrient dynamics of an intertidal sandflat in Tokyo Bay[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **57**(5): 929-940.
- [17] Ullman W J, Sandström M W. Dissolved nutrient fluxes from the nearshore sediments of Bowling Green Bay, Central Great Barrier Reef Lagoon (Australia) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1987, **24**(3): 289-303.
- [18] Falcão M, Vale C. Sediment-water exchanges of ammonium and phosphate in intertidal and subtidal areas of a mesotidal coastal lagoon (Ria Formosa) [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **373-374**: 193-201.
- [19] Krom M D, Berner R A. The diffusion coefficients of sulfate, ammonium, and phosphate ions in anoxic marine sediments[J]. *Limnology & Oceanography*, 1980, **25**(2): 327-337.
- [20] Warnken K W, Gill G A, Santschi P H, *et al.* Benthic exchange of nutrients in Galveston Bay, Texas[J]. *Estuaries and Coasts*, 2000, **23**(5): 647-661.
- [21] Urban N R, Dinkel C, Wehrli B. Solute transfer across the sediment surface of a eutrophic lake: I. Porewater profiles from dialysis samplers [J]. *Aquatic Sciences*, 1997, **59**(1): 1-25.
- [22] 古小治, 张雷, 柏祥, 等. 南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究[J]. 环境科学, 2010, **34**(4): 939-945.
- [23] 李文霞, 冯海艳, 杨忠芳, 等. 水体富营养化与水体沉积物释放营养盐[J]. 地质通报, 2006, **25**(5): 602-608.
- [24] 蒋增杰, 崔毅, 陈碧鹃. 唐岛湾网箱养殖区沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1001-1005.
- [25] 张路, 范成新, 王建军, 等. 太湖草藻型湖区间隙水理化特性比较[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(5): 556-560.
- [26] Grenz C, Denis L, Pringault O, *et al.* Spatial and seasonal variability of sediment oxygen consumption and nutrient fluxes at the sediment water interface in a sub-tropical lagoon (New Caledonia) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **61**(7-12): 399-412.
- [27] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 359-366.
- [28] Cermelj B, Bertuzzi A, Faganeli J. Modelling of pore water nutrient distribution and benthic fluxes in shallow coastal waters (Gulf of Trieste, Northern Adriatic) [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **99**(1-4): 435-444.
- [29] Cha H J, Lee C B, Kim B S, *et al.* Early diagenetic redistribution and burial of phosphorus in the sediments of the southwestern East Sea (Japan Sea) [J]. *Marine Geology*, 2005, **216**(3): 127-143.
- [30] 李宝, 范成新, 丁士明, 等. 滇池福保湾沉积物磷的形态及其与间隙水磷的关系[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 27-32.
- [31] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——2 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 207-217.
- [32] Pagès A, Teasdale P R, Robertson D, *et al.* Representative measurement of two-dimensional reactive phosphate distributions and co-distributed iron (II) and sulfide in seagrass sediment porewaters [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(8): 1256-1261.
- [33] Christophoridis C, Fytianos K. Conditions affecting the release of phosphorus from surface lake sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(4): 1181-1192.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行