

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟筒降雨成因分析	欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
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	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α -FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收锑的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)
《环境科学》征订启事 (1965) 《环境科学》征稿简则 (2115) 信息 (1925, 2076, 2084, 2146)	

调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应

万由鹏,尹魁浩,彭盛华

(深圳市环境科学研究院,国家环境保护饮用水水源地管理技术重点实验室,深圳市饮用水水源地安全保障重点实验室,深圳 518001)

摘要:以南方某典型的调水型水库为研究对象,采用EFDC模型建立了水库的三维水动力和富营养化模型,并根据长历时的水文和水质数据对模型进行了率定和验证。基于模型计算结果,分析了水库氮、磷浓度对藻类生长的影响,计算了藻类对调水氮、磷浓度及调水量的响应关系。结果表明,水库氮、磷浓度对藻类生长的限制作用很小。在降幅相同的情况下,降低磷浓度比降低氮浓度的藻类浓度降幅更大,削减60%的氮,叶绿素a无明显下降,削减60%的磷,叶绿素a平均下降12.4%,分别削减90%的氮和磷,叶绿素a分别平均下降17.9%和35.1%。当调水量高于现状的20%,藻类浓度随调水量增大而降低,当调水量低于20%,藻类浓度随调水量增大而升高,调水量比现状增大1倍,叶绿素a平均降低25.7%,调水量降至20%,叶绿素a平均升高38.8%。本研究对于支撑水源地的富营养化控制工作具有重要意义。

关键词:调水型水库;藻类浓度;氮、磷浓度;水量;响应;数值模拟

中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2015)06-2054-07 DOI: 10.13227/j.hjkx.2015.06.019

Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir

WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua

(State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Management and Technology, Shenzhen Key Laboratory of Drinking Water Source Safety Control, Shenzhen Academy of Environmental Science, Shenzhen 518001, China)

Abstract: Taking a pumped storage reservoir located in southern China as the research object, the paper established a three-dimensional hydrodynamic and eutrophication model of the reservoir employing EFDC (environmental fluid dynamics code) model, calibrated and verified the model using long-term hydraulic and water quality data. Based on the model results, the effects of nitrogen and phosphorus concentrations on the algae growth were analyzed, and the response of algae to nitrogen and phosphorus concentration and quantity of pumping water was also calculated. The results showed that the nitrogen and phosphorus concentrations had little limit on algae growth rate in the reservoir. In the nutrients reduction scenarios, reducing phosphorus would gain greater algae biomass reduction than reducing nitrogen. When reducing 60 percent of nitrogen, the algae biomass did not decrease, while 12.4 percent of algae biomass reduction could be gained with the same reduction ratio of phosphorus. When the reduction ratio went to 90 percent, the algae biomass decreased by 17.9 percent and 35.1 percent for nitrogen and phosphorus reduction, respectively. In the pumping water quantity regulation scenarios, the algae biomass decreased with the increasing pumping water quantity when the pumping water quantity was greater than 20 percent of the current value; when it was less than 20 percent, the algae biomass increased with the increasing pumping water quantity. The algae biomass decreased by 25.7 percent when the pumping water quantity was doubled, and increased by 38.8 percent when it decreased to 20 percent. The study could play an important role in supporting eutrophication controlling in water source area.

Key words: pumped storage reservoir; algae biomass; nitrogen and phosphorus concentration; water quantity; response; numerical simulation

根据水利部发布的《2012年中国水资源公报》,全国轻度及中度富营养的湖泊和水库分别占65%和31%,还有少数水库为重度富营养,由此可见,我国湖泊、水库的富营养化形势已十分严峻。富营养水体中氮、磷等营养盐含量偏高,藻类等浮游生物在适宜的环境条件下可能过度生长繁殖而破坏水生生态系统,国内外已经开展了大量关于水体富营养化的研究^[1~9]。为解决局部地区缺水问题,城市湖泊、水库等饮用水源普遍存在相互引调水的情况,由此也引发了氮、磷等污染物跨流域转移而使富营养

化水体扩散的问题,这进一步加剧了城市湖泊、水库富营养化严峻的形势,但是目前关于调水对湖泊、水库藻类生长的研究还比较少见。湖泊、水库的水生态系统十分复杂,影响藻类生长的因素很多,常见的有水温、光照以及营养盐浓度等,有许多文献研究了藻类生长与营养盐浓度等因子的关系^[10~15]。近年来,随着计算机和数值计算技术的发展,国内外

收稿日期:2014-11-13; 修订日期:2015-01-11

作者简介:万由鹏(1983~),男,工程师,主要研究方向为水环境数值模拟, E-mail: wanyp2009@qq.com

有许多关于藻类生长及富营养化模型研究的报道^[16~21]. 为研究调水对湖泊、水库藻类生长的影响, 本文采用建立水动力和富营养化数值模型的方法, 选取南方某典型的调水型水库(“S 水库”)作为研究对象, 分析 S 水库的藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应关系.

S 水库的集雨面积 60.5 km², 正常库容 3 350 万 m³, 水域面积 3.1 km², 每年调水量约 13.5 亿 m³, 除每年 12 月工程检修期间不调水(持续时间 5~7 d), 其余时间每天都调水, 平均调水量为 370 万 m³·d⁻¹, 原水经引水隧洞自然流入 S 水库. 调水是 S 水库的主要水源, 调水量占总来水量的 97%, 其余 3% 的水量主要来自入库支流. 由调水引入 S 水库的氮、磷负荷分别占总负荷的 97% 和 95%, 其中氮主要以硝氮形式存在, 水库中的取水口取水是氮损耗的主要途径, 磷除了通过取水口取水损耗, 还有约 40% 通过颗粒物沉降到库底. 库区总氮浓度约 2.2 mg·L⁻¹, 总磷浓度约 0.044 mg·L⁻¹, 叶绿素 a 浓度约 12 μg·L⁻¹, S 水库存在暴发藻华的风险. 本研究成果可以量化调水氮、磷浓度削减之后, 水库藻类浓度的预期降幅, 以及调节调水量之后藻类浓度的响应, 这对于支撑水源地富营养化控制的工作具有重要意义.

$$f_3(T) = \begin{cases} \exp[-KTG1_A \cdot (T - TM1_A)^2], & T \leq TM1_A \\ 1, & TM1_A < T < TM2_A \\ \exp[-KTG2_A \cdot (T - TM2_A)^2], & T \geq TM2_A \end{cases} \quad (8)$$

式(1)是水质因子输运方程, 式(2)是藻类生长动力学方程, 式(3)~(8)是藻类生长速率计算公式. 公式中, H 是水深, u 、 v 、 w 分别是 x 、 y 、 z 方向的速度分量, m_x 和 m_y 是度量张量的对角元素的平方根, $m = m_x m_y$ 是雅克比行列式; c 是水质因子的浓度, S_c 是源汇项, A_x 、 A_y 、 A_z 分别是 x 、 y 、 z 方向的紊动扩散系数; c_A 是藻类质量浓度, P_A 是藻类生长速率, WB_A 是藻类的外源负荷, V 是体积, $f_1(N)$ 、 $f_2(I)$ 、 $f_3(T)$ 分别是营养盐浓度、光照强度、水温对藻类生长速率的影响系数. NH_4^+-N 是氨氮浓度, $NO_3^- - N$ 是硝氮浓度, $PO_4^{3-} - P$ 是磷酸盐浓度, I 是光照强度, I_{sx} 是藻类生长的最优光照强度, T 是水温, 更多参数的物理含义参见表 1. EFDC 模型采用藻类的质量浓度代表藻类的数量, 藻类质量浓度与叶绿素 a (Chla) 通过公式 $c_A = CChl_A \cdot Chla$ 进行转换, 系数 $CChl_A$ 取值见表 1.

1 水动力和富营养化模型构建

1.1 EFDC 模型简介

EFDC 模型是一个开源的水动力-水质模型, 可用于模拟湖泊、水库、河流、海湾等地表水体的三维水动力、水质状况. 该模型最早由美国弗吉尼亚海洋研究所开发^[22], 现在由美国环保署 (US EPA) 提供支持, 目前被许多研究机构、大学广泛使用, 有十分丰富的应用研究案例^[23~26]. EFDC 模型水动力模块的基本控制方程参见文献^[27], 水质因子输运及藻类生长的控制方程如下^[28]:

$$\begin{aligned} \partial_t(mHc) + \partial_x(m_y Huc) + \partial_y(m_x Hvc) + \partial_z(mwc) \\ = \partial_x(m_y m_x^{-1} HA_x \partial_x c) + \partial_y(m_x m_y^{-1} HA_y \partial_y c) + \\ \partial_z(mA_z H^{-1} \partial_z c) + mHS_c \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial_t c_A = (P_A - BM_A - PR_A) c_A + \\ \partial_z(WS_A c_A) + WB_A V^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$P_A = PM_A \cdot f_1(N) \cdot f_2(I) \cdot f_3(T) \quad (3)$$

$$f_1(N) = \min(f_{1N}, f_{1P}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_{1N} = [(NH_4^+ - N) + (NO_3^- - N)] \cdot \\ [KHN_A + (NH_4^+ - N) + (NO_3^- - N)]^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$f_{1P} = (PO_4^{3-} - P) \cdot [KHP_A + (PO_4^{3-} - P)]^{-1} \quad (6)$$

$$f_2(I) = I \cdot I_{sx}^{-1} \cdot \exp(1 - I \cdot I_{sx}^{-1}) \quad (7)$$

1.2 区域概化及边界条件

模型在水平方向有 184 个计算网格, 见图 1(a), 网格尺寸约 140 m, 垂直方向采用 σ 坐标系, 均分为 8 层. S 水库的调水和入库支流作为模型的源项, 采用日均流量作为边界条件; 水库内有位于 2 号点与 3 号点等位置的 7 个取水口, 均作为模型的汇项, 采用日取水量作为边界条件. 藻类生长受光照等气象因子影响大, 因此, 采用实测的逐时太阳辐射、气温、降雨量、风速等气象数据作为模型的气象输入条件.

1.3 模型率定与验证

采用 2009~2010 年 1 号点(表层)实测的逐日水位数据和逐月水质数据, 对模型参数进行率定, 率定后的主要参数取值见表 1. 采用 2011~2012 年的实测数据对率定后的模型进行验证. 计算的流场图见图 1(b), 流态与实际情况相符. 2009~2012 年, 模型计算值与实测值对比见图 2 和图 3, 水位、水

表 1 经率定后主要模型参数的取值

Table 1 Values of the key model parameters after calibration

序号	参数符号	物理含义	取值	单位
1	z_0	底面糙率高度	0.02	m
2	PM_A	藻类最大生长速率	2.2	d^{-1}
3	BM_A	藻类新陈代谢速率	0.12	d^{-1}
4	PR_A	藻类被捕食速率	0.01	d^{-1}
5	WS_A	藻类沉降速率	0.2	$m \cdot d^{-1}$
6	KHN_A	藻类摄取氮的半饱和和常数	0.012	$mg \cdot L^{-1}$
7	KHP_A	藻类摄取磷的半饱和和常数	0.001	$mg \cdot L^{-1}$
8	$TM1_A$	藻类生长最适温度的下限值	22	$^{\circ}C$
9	$TM2_A$	藻类生长最适温度的上限值	28	$^{\circ}C$
10	$KTG1_A$	低于最适温度下限值时温度对藻类生长的影响系数	0.008	无量纲
11	$KTG2_A$	高于最适温度上限值时温度对藻类生长的影响系数	0.01	无量纲
12	$CChl_A$	藻类碳-叶绿素 a 比	0.045	$mg \cdot \mu g^{-1}$
13	$rNitM$	硝化反应速率	0.04	$g \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$
14	KDN	溶解性有机氮水解速率	0.07	d^{-1}
15	KDP	溶解性有机磷水解速率	0.05	d^{-1}

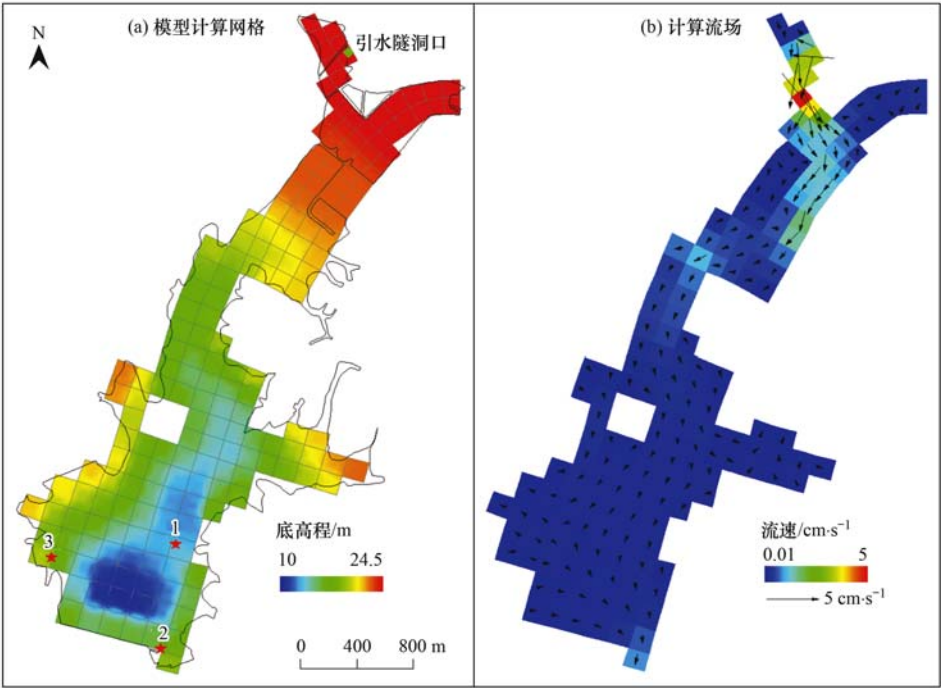


图 1 模型计算网格及计算流场

Fig. 1 Model cells and simulated vector field

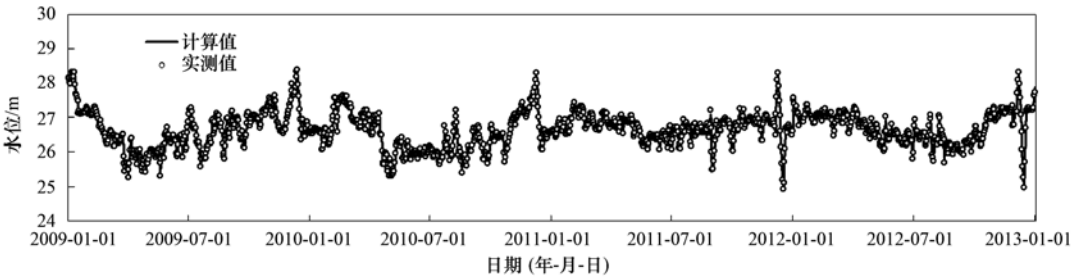


图 2 2009 ~ 2012 年水位计算值与实测值对比

Fig. 2 Calculated and measured water elevation values in year 2009 to 2012

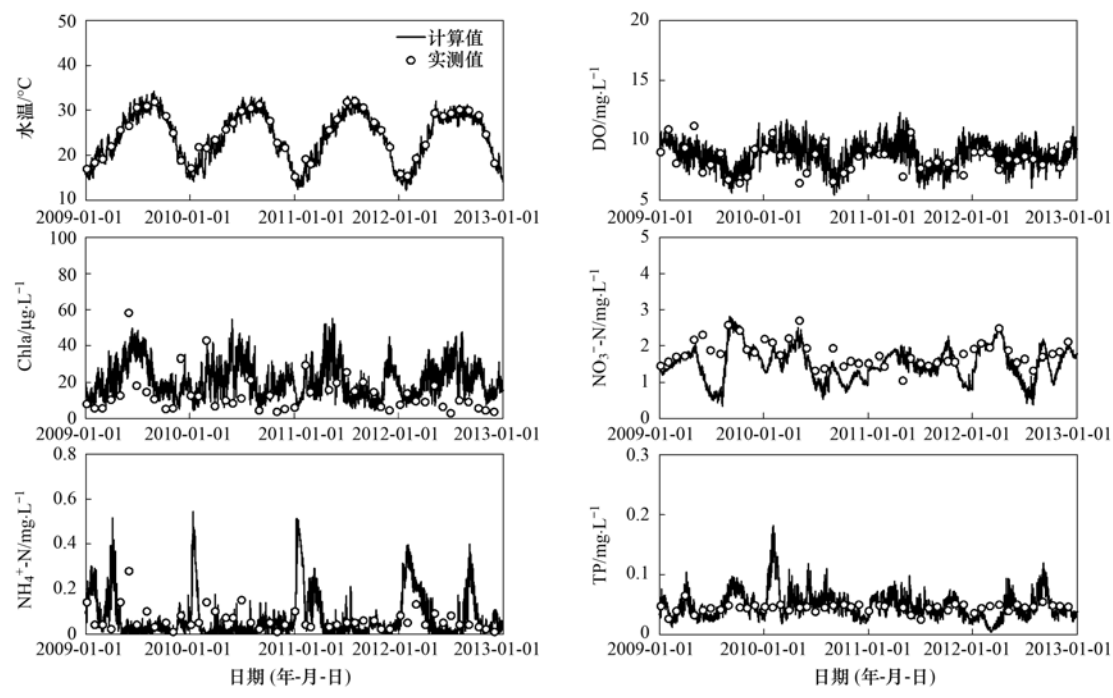


图3 2009~2012年主要水质指标计算值与实测值对比

Fig. 3 Calculated and measured values of key water quality variables in year 2009 to 2012

温、溶解氧 (DO)、叶绿素 a (Chl a)、硝氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、总磷 (TP) 的计算均值分别为 26.637 m、23.9℃、8.70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、20.53 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、1.51 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.076 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.048 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，与实测值的偏差分别为 -0.003 m、-0.7℃、0.31 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、7.75 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、-0.27 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.014 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.004 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总体上，模型的计算值与实测值吻合较好，能够反映出 S 水库实际的水力及水质状况。

2 结果与讨论

2.1 营养盐、光照、水温对藻类生长的影响

采用式(5)和(6)分别计算氮、磷浓度对藻类生长速率的影响系数，结果见图4。其中显示，氮的影响系数在0.973~0.995之间，均值为0.992，磷的影响系数在0.759~0.992之间，均值为0.965，磷的影响系数小于氮。根据式(7)计算光照强度对藻类

生长速率的影响系数，结果表明，由于光照强度随水深增加而衰减，因此光照强度对藻类生长的影响系数在垂直方向分层十分明显，以1号点(见图1)为例，该点平均水深为13 m，在白天有光照的情况下，表层水体光照强度对藻类生长的影响系数平均为0.520，中层水体为0.022，底层水体为0.002。根据式(8)计算水温对藻类生长的影响系数，结果表明，水温较低的1月、2月和12月，影响系数平均为0.740，其余月份均高于0.9，全年均值为0.917。

与南方地区的很多水库不同，S水库属于典型调水型水库，水质主要受调水水源的影响，而该调水水源为河流型饮用水源地，水体中的氮、磷营养盐浓度偏高，原水进入S水库，使水库中的营养盐浓度升高，在这种情况下，氮、磷对藻类生长速率的影响系数都接近于1，这说明营养盐对藻类生长的限制作用很小，在光照、水温等环境条件适宜的情况下，藻类将可能大量繁殖，水库存在暴发藻华的风险。

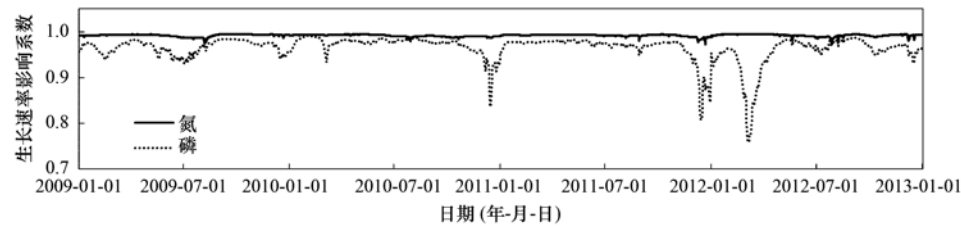


图4 氮、磷营养盐浓度对藻类生长速率的影响系数

Fig. 4 Affecting factors of nitrogen and phosphorus concentrations on algae growth rate

通常,光照和水温等环境条件均难以控制,实施流域污染治理,降低调水水源地的营养盐浓度,是控制 S 水库藻华暴发的根本途径。

2.2 藻类对调水氮、磷浓度的响应

近年来,S 水库的调水水源地在逐步推进流域污染综合整治,制定了近期、中期和远期的水环境提升计划,在不同阶段,水源地氮、磷浓度将有不同程度削减. 以 2012 年为例,设计 3 组降低氮、磷浓度的方案(调水量不变),第 1 组方案只降低氮浓

度,降幅分别为 0%、10%、20%、40%、60%、80%、90% 和 95%,降幅为 0% 表示不降低,为基准值;第 2 组方案只降低磷浓度,降幅同上;第 3 组方案同时降低氮和磷浓度,降幅均同上. 计算各时刻水库中所有网格的叶绿素 a 平均值及最大值,分别称为均值和峰值,再计算均值和峰值的全年平均值,结果如图 5 所示(由于第 2、3 组方案的结果相同,因此图中仅列出第 1、2 组方案的结果),以第 2 组方案为例,叶绿素 a 全年变化见图 6。

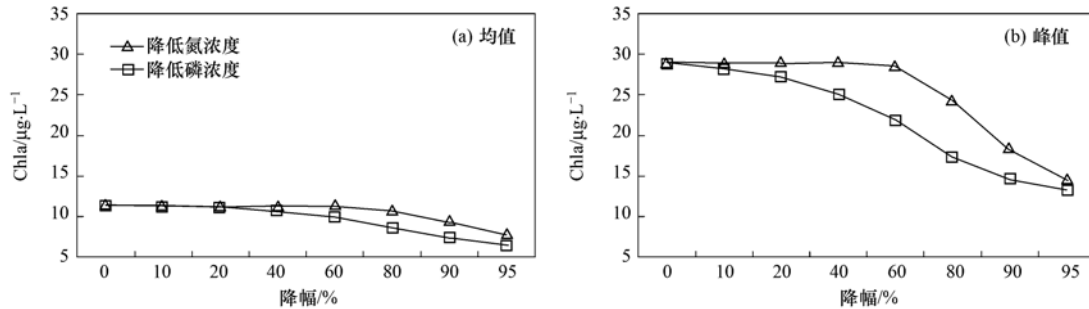


图 5 不同氮、磷浓度降幅下水库叶绿素 a 均值和峰值的年均值

Fig. 5 Average chlorophyll a and annual average of peak chlorophyll a under different nitrogen and phosphorus concentration reduction

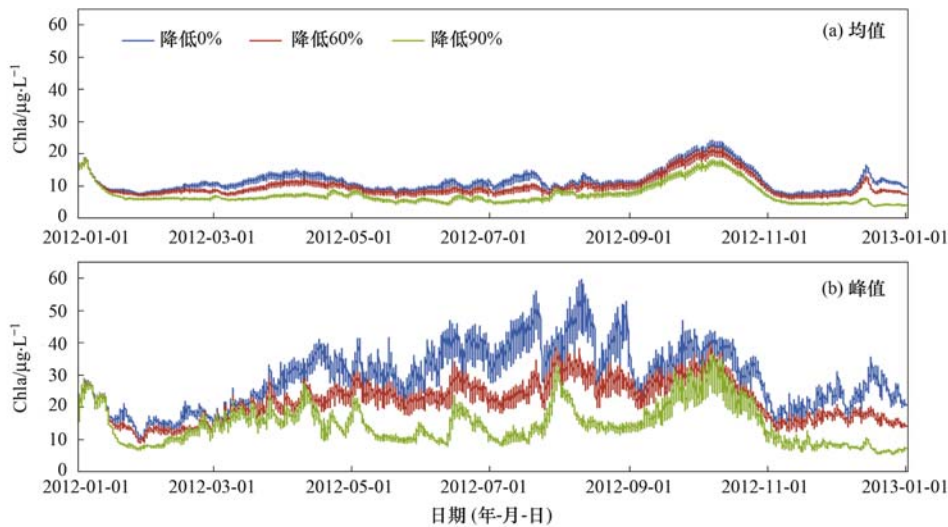


图 6 不同的磷浓度降幅下水库叶绿素 a 均值和峰值随时间变化曲线

Fig. 6 Temporal trends of average and peak chlorophyll a concentrations under different phosphorus concentration reduction

氮浓度降低 60% 时,叶绿素 a 无明显下降,降幅继续增大,叶绿素 a 则呈直线下降,降幅分别为 80%、90% 和 95% 时,叶绿素 a 均值的年均值分别下降 5.9%、17.9% 和 31.7%,峰值的年均值分别下降 15.9%、36.6% 和 50.1%;与氮不同,磷浓度降低 60% 时,叶绿素 a 有较大降幅,均值和峰值的年均值分别下降 12.4% 和 24.5%,磷浓度降幅分别为 80%、90% 和 95% 时,叶绿素 a 均值的年均值分别下降 24.3%、35.1% 和 42.8%,峰值的年均值分别下降

40.1%、49.6% 和 54.0%。短时期内可优先削减调水水源的磷负荷,即可有效控制 S 水库的藻类生长,等未来流域污染控制工作陆续完成,氮、磷污染负荷大幅削减之后,S 水库的藻类浓度将显著降低。

2.3 藻类对调水量的响应

将水库的正常库容与入库流量(调水量与库区径流之和)的比值定义为水体置换时间,置换时间越短,说明水体置换速度越快. 以 2012 年为例,设计 1 组调节调水量的方案(调水的氮、磷浓度不

变),调水量分别为 2%、5%、10%、20%、40%、60%、80%、100%、120%、150% 和 200%,其中 100% 表示现状调水量,200% 表示现状调水量的 2 倍,余者类推. 计算结果见图 7~9. 增大调水量,水体置换时间缩短,水体置换加快,藻类所受物理冲刷作用增强,同时水库中的营养盐浓度升高. 冲刷作

用增强使藻类浓度下降,营养盐浓度升高使藻类生长速率增大,在两者的双重作用下,当调水量高于 20%,藻类浓度随调水量增大而降低,表明此时物理冲刷作用对藻类浓度的影响占主导地位;当调水量低于 20%,藻类浓度随调水量增大而升高,表明此时营养盐对藻类生长的影响占主导地位.

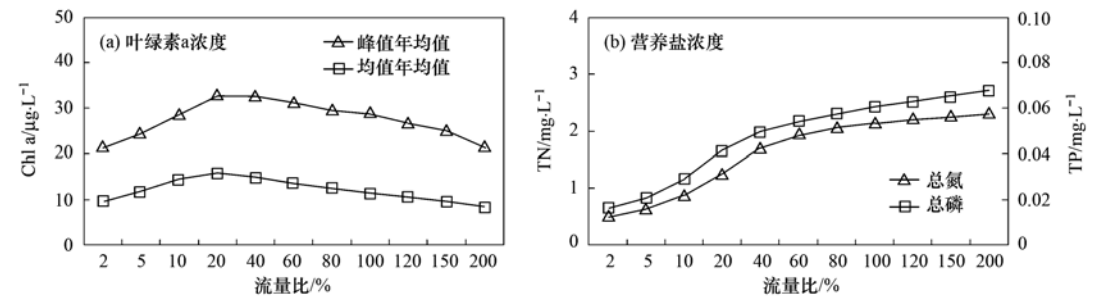


图 7 调节调水量时水库叶绿素 a 与营养盐浓度变化
Fig. 7 Variation in concentrations of chlorophyll a and nutrients at different inflow water mass

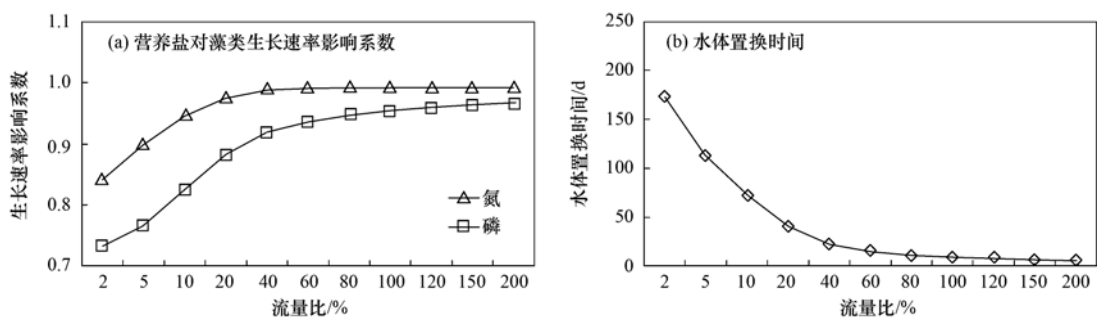


图 8 调节调水量时营养盐对藻类生长速率影响系数及水体置换时间变化
Fig. 8 Nutrients affecting factors on algae growth rate and water replacement time at different inflow water mass

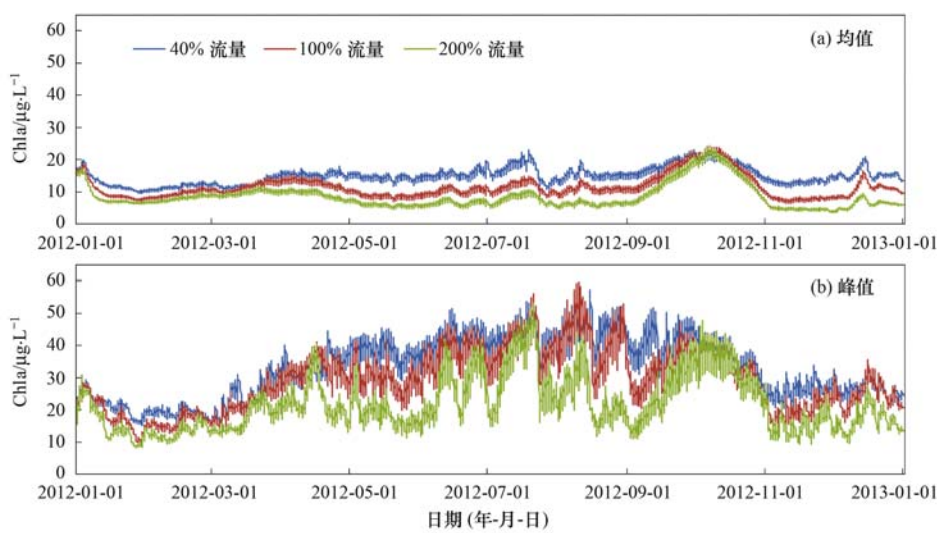


图 9 调节调水量时水库叶绿素 a 均值和峰值随时间变化曲线
Fig. 9 Temporal trends of average and peak chlorophyll a concentrations at different inflow water mass

与现状(100% 流量)相比,调水量增大 1 倍,总氮升高 7.7%,总磷升高 12.5%,水体置换时间缩短 49%,叶绿素 a 的均值和峰值均降低 25.7%;调水量调节为 20%,总氮降低 42.1%,总磷降低 31.6%,

水体置换时间增大 3.4 倍, 叶绿素 a 均值升高 38.8%, 峰值升高 13.3%; 调水量降至 2%, 总氮降低 76.4%, 总磷降低 73.1%, 水体置换时间增大 17.3 倍, 叶绿素 a 均值降低 15.3%, 峰值降低 25.7%。在短期内可通过加大调水量来控制 S 水库的藻类浓度过快增长。

3 结论

(1) 磷对藻类生长速率的影响系数小于氮, 并且两者均接近于 1, 表明氮、磷营养盐对藻类生长的限制作用很小。

(2) 在降幅相同的情况下, 降低磷浓度比降低氮浓度的藻类浓度降幅更大。削减 60% 的氮, 叶绿素 a 无明显下降, 削减 60% 的磷, 叶绿素 a 平均下降 12.4%; 削减 90% 的氮, 叶绿素 a 平均下降 17.9%, 削减 90% 的磷, 叶绿素 a 平均下降 35.1%。

(3) 当调水量高于现状的 20%, 藻类浓度随调水量增大而降低, 当调水量低于 20%, 藻类浓度随调水量增大而升高。调水量比现状增大 1 倍, 叶绿素 a 平均降低 25.7%; 调水量降至 20%, 叶绿素 a 平均升高 38.8%; 调水量降至 2%, 叶绿素 a 平均降低 15.3%。

参考文献:

- [1] 曹金玲, 许其功, 席北斗, 等. 我国湖泊富营养化效应区域差异性分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1777-1783.
- [2] 王岩, 姜霞, 李永峰, 等. 洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(5): 484-491.
- [3] Smith V H, Joye S B, Howarth R W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems [J]. Limnology and Oceanography, 2006, **51**(1, part 2): 351-355.
- [4] Schindler D W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication [J]. Limnology and Oceanography, 2006, **51**(1, part 2): 356-363.
- [5] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: where do we go from here? [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2009, **24**(4): 201-207.
- [6] Robson B J. State of the art in modelling of phosphorus in aquatic systems: Review, criticisms and commentary [J]. Environmental Modelling & Software, 2014, **61**: 339-359.
- [7] Huang C C, Wang X L, Yang H, et al. Satellite data regarding the eutrophication response to human activities in the plateau lake Dianchi in China from 1974 to 2009 [J]. Science of the Total Environment, 2014, **485-486**(3): 1-11.
- [8] Lüring M, van Oosterhout F. Controlling eutrophication by combined bloom precipitation and sediment phosphorus inactivation [J]. Water Research, 2013, **47**(17): 6527-6537.
- [9] Pinto U, Maheshwari B, Shrestha S, et al. Modelling eutrophication and microbial risks in peri-urban river systems using discriminant function analysis [J]. Water Research, 2012, **46**(19): 6476-6488.
- [10] 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 等. 太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 [J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 80-86.
- [11] 许慧萍, 杨桂军, 周健, 等. 氮、磷浓度对太湖水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*) 群体生长的影响 [J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 213-220.
- [12] 于婷, 戴景峻, 雷腊梅, 等. 温度、光照强度及硝酸盐对拟柱孢藻 (*Cylindropermopsis raciborskii* N8) 生长的影响 [J]. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 441-446.
- [13] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2265-2271.
- [14] Correll D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**(2): 261-266.
- [15] Brown C D, Hoyer M V, Bachmann R W, et al. Nutrient-chlorophyll relationships: an evaluation of empirical nutrient-chlorophyll models using Florida and north-temperate lake data [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, **57**(8): 1574-1583.
- [16] 韩菲, 陈永灿, 刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述 [J]. 水科学进展, 2003, **14**(6): 785-791.
- [17] 吴挺峰, 高光, 晁建颖, 等. 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策 [J]. 水利学报, 2009, **40**(4): 391-397.
- [18] 刘浩, 潘伟然. 营养盐负荷对浮游植物水华影响的模型研究 [J]. 水科学进展, 2008, **19**(3): 345-351.
- [19] 武春芳, 徐明德, 李璐, 等. 太原市迎泽湖富营养化控制的模型研究 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 485-491.
- [20] Liu Y, Wang Y L, Sheng H, et al. Quantitative evaluation of lake eutrophication responses under alternative water diversion scenarios: A water quality modeling based statistical analysis approach [J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 219-227.
- [21] Wool T A, Davie S R, Rodriguez H N. Development of three-dimensional hydrodynamic and water quality models to support total maximum daily load decision process for the Neuse river estuary, North Carolina [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, **129**(4): 295-306.
- [22] Hamrick J M. A Three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects [Special Report 317] [R]. Williamsburg: College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, 1992. 1-22.
- [23] 万由鹏, 毛献忠. 深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 数值模拟及减排效果分析 [J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 384-391.
- [24] Ji Z G, Morton M R, Hamrick J M. Wetling and drying simulation of estuarine processes [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, **53**(5): 683-700.
- [25] Yang Z Q, Hamrick J M. Optimal control of salinity boundary condition in a tidal model using a variational inverse method [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, **62**(1-2): 13-24.
- [26] Wu G Z, Xu Z X. Prediction of algal blooming using EFDC model: Case study in the Daoxiang Lake [J]. Ecological Modelling, 2011, **222**(6): 1245-1252.
- [27] Tetra Tech, Inc. The environmental fluid dynamics code, theory and computation, volume 1: Hydrodynamics and mass transport [R]. California: Tetra Tech, Inc, 2007. 1-12.
- [28] Tetra Tech, Inc. The environmental fluid dynamics code, theory and computation, volume 3: Water quality module [R]. California: Tetra Tech, Inc, 2007. 13-21.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行