ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第1期
2017年1月15日

目 次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 …… 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 …… 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于GAM模型分析影响因素交互作用对$PM_{2.5}$浓度变化的影响 …… 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 …… 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 …… 赵佳玉,张弥,肖薇,王伟,吴红艳,张圳,肖启涛,胡诚,于洲,曹正达,徐敬争,刘寿东,李旭辉(41)
闽江口短叶茳芏+芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性CH_4与CO_2浓度日动态 …… 谭立山,杨平,何露露,黄佳芳,胡智强,仝川(52)
河南鸡冠洞CO_2季节和昼夜变化特征及影响因子比较 … 张萍,杨琰,孙喆, 梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 …… 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 …… 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛, 余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 …… 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 …… 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于LDI的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 …… 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征 …… 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻形态功能组(MBFG)的季节演替特征 …… 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性C、N变化及影响因素 …… 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 …… 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 …… 贾珺杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 …… 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中32种PPCPs类物质的污染水平、分布特征及风险评估 …… 张芹, 张圣虎, 汪贞,郭敏, 刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 …… 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 …… 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 …… 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 …… 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 …… 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 …… 赵纯,张帅 ,周宇 ,李琨 ,周炜 , 黎鹏宇 ,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性PVDF中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 …… 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe^{2+})-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 …… 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性 …… 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
硫自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 …… 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON在SBAF中的快速启动及其微生物特征 …… 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 …… 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 …… 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 …… 郑莹,潘杨,周晓华,廖烜弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 …… 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 …… 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 …… 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 …… 李南洁,曾清苹, 何丙辉, 周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 …… 刘晋仙,李毳,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 …… 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 …… 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤Eh值对水稻Cd迁移与累积的影响 …… 田桃,曾敏, 周航, 徐珺, 杨文弢, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒(343)
茫、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 …… 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 …… 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李晓,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 …… 李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云(368)
多孔SBA-15颗粒对Cd(Ⅱ)的吸附缝合及其对土壤Cd(Ⅱ)的修复潜力 …… 黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集 …… 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 …… 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 …… 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 …… 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 …… 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征

陈小华[1],李小平[2],钱晓雍[1],胡双庆[1]
(1. 上海市环境科学研究院,上海 200233; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200062)

摘要: 基于云南洱海长时间尺度水质观测数据,运用分位数回归方法分析浮游藻类叶绿素 a(Chl-a)对氮(N)、磷(P)、水温的定量响应关系. 结果表明过去 20 余年洱海藻类生物量受水温、N、P 共同影响,随着洱海富营养化程度的加剧,水温对藻类生物量的相对重要度在持续下降,斜率平均值从 2.70 下降至 0.44. 而营养物对藻类的促进效应明显在提升,尤其是 TP 对藻类的相对重要度持续在攀升,斜率平均值从 -0.3 增长至 0.8. TN 对藻类生物量整体表现为较稳定的正效应,但近些年(2008 ~ 2013 年)TN 对藻类正效应达到最低. 2002 之后,P 已逐渐取代 N 成为最重要的营养物限制因子. 在季节方面,春季和秋季以水温和 N 的共同限制为主导,但春季当 Chl-a > 8 mg·m^{-3}时, N 和水温对藻类的正效应逐渐被 P 取代. 夏季完全以 N、P 共同限制效应占主导,当 Chl-a > 3 mg·m^{-3}时,TP 的正效应逐渐超过 TN,冬季则以 P 和水温的共同限制效应为主导. 在气候变暖的大背景下,洱海富营养化控制应以"控 P"为主和 N、P 协同削减的策略. 当前富营养化控制过程中,应着重监控春、秋两季温度短期快速上升可能引发的全湖藻华风险.

关键词:营养物; 水温; 分位数回归; 藻类叶绿素 a; 洱海
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)01-0113-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201607041

Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression

CHEN Xiao-hua[1], LI Xiao-ping[2], QIAN Xiao-yong[1], HU Shuang-qing[1]
(1. Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Based on water quality monitoring data of Lake Erhai from 1990 to 2013, the yearly and seasonally response characteristics of algal chlorophyll-a to total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and water temperature was investigated using quantile regression method. It indicated that water temperature was always the primary limiting factor of algal biomass indicated by chlorophyll a (Chl-a) across recent 24 years, but its limiting effect on algal Chl-a content was kept descending sharply and replaced much by nutrients (e.g. P, N) with the increasing eutrophic level. Especially the slope values of TP on Chl-a were kept ascending from -0.3 to 0.8. Since 2002, the positive effect of TN on Chl-a presented slow descending tendency, and P became the most important limiting nutrient factor of algal growth. According to the seasonal variation analysis, water temperature and N had dominant effects on algal Chl-a in spring and autumn, but they were replaced by P in the case of Chl-a > 8 mg·m^{-3} in spring. In summer, N and P had strong interactive impacts on the algal growth, and the positive effect of P was stronger than that of N in the case of Chl-a > 3 mg·m^{-3}. In winter, algal biomass was co-limited by temperature and P. It suggested that P reduction is the prior choice of eutrophication control of Lake Erhai, and simultaneously reducing N load is necessary in the background of global warming. In addition, so far a emergency controlling measure should be taken to monitor algal blooming due to sharp ascending of water temperature within a few days in spring and autumn.

Key words: nutrients; water temperature; quantile regression; algae chlorophyll a; Lake Erhai

湖泊富营养化导致的藻类暴发一直是我国最为突出的水环境问题之一[1]. 藻类过度生长是多种因素共同作用的结果,既包括水温、光照、风速等自然因素,也包括氮(N)、磷(P)、铁(Fe)等营养物过量排放的人类活动因素[2,3]. 在诸多因素中,全球气候变暖背景下的水温变化与高强度人类活动所引起的 N、P 排放增加被认为是导致湖泊富营养化最关键因素,因此,同时考虑水温、N、P 因子变化的湖泊富营养化相关研究在逐渐增多[4~6],但温度与营养物对湖泊藻类生物量的交互作用等还需要深入研究[7],比如水温、N、P 促进藻类生物量增长的相对重要度的长期变化规律和季节性特征.

富营养化湖泊的藻类生长是自然界中一个非期望或非平均的现象,藻类生物量数据异质性很强,水华期间的藻类数据会呈"高峰厚尾"的分布,或存在显著的异方差等情况[8]. 近年来在环境科学和生态学领域受到重视的分位数回归(quantile regression)方法特别适合处理这种波动性大、异质性很强的环

收稿日期: 2016-07-06; **修订日期**: 2016-08-10
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001-006)
作者简介: 陈小华(1978 ~),男,博士,高级工程师,主要研究方向为生态修复理论及工程技术,E-mail: shoutfar@aliyun.com

境数据[9,10]. 该方法可针对回归变量任何一个分位点进行回归分析,且在存在极端值或重尾情况时仍能保持较好的稳健性,适宜处理应变量对自变量的极端响应,而不只是平均水平的响应[11~13],因此能更加全面地反映藻类生物量对水温、N、P 等环境指标的响应特征. 本研究基于云南洱海长时间尺度(1990~2013 年)的水质观测数据,运用分位数回归方法,按不同年份区间和不同季节分别分析洱海藻类生物量[以叶绿素 a(Chl-a)表征]对 N、P、水温的定量响应关系,探讨营养物因子与水温因子相对重要性的长时间尺度演变规律和季节性变化规律,对制定洱海富营养化控制策略提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

洱海是云南省第二大高原淡水湖泊,为滇西最大的断陷湖,跨洱源、大理两县市,处于东经 100°06′~100°17′,北纬 25°36′~25°55′之间. 水面面积 249.80 km^2,汇水面积2 565.0 km^2,最大水深 21.0 m,平均水深 10.5 m,库容 28.8 亿 m^3(图 1). 洱海是沿湖人民生活、灌溉、工业用水的主要水源地,是整个流域社会经济可持续发展的基础[14]. 洱海湖面多年平均海拔1 965.8 m,光照充足,辐射强,气温温和,为浮游藻类的大量繁殖提供了有利条件. 区年均气温 15℃左右,年均降雨量1 055 mm,年均蒸发量1 970 mm. 流域水系发达,入湖河流大小共 117 条.

1.2 数据来源

从云南省环境监测中心站、中国大理洱海湖泊研究中心等环境监测和研究部门收集了洱海 1990~2013 年的水环境常规监测数据,全湖水质监测点为 13 个(图 1),经纬度依次为:25° 51′ 36″ N 100°10′12″E, 25°51′18″N 100°11′24″ E, 25°51′00″N 100°12′36″E, 25°41′42″N 100°12′54″E, 25°42′00″N 100°13′48″E, 25°42′18″N 100°15′00″E, 25°37′48″N 100°13′48″E, 25°36′0″N 100°15′0″E, 25°37′60″N 100°15′50″E, 25°55′30″N 100° 6′54″E, 25°54′54″N 100°8′42″E, 25°54′36″N 100°10′48″E, 25°47′29″N 100°11′43″E. 水质指标主要包括总氮(TN)、总磷(TP)、水温、藻类叶绿素 a(Chl-a),采样频次为一年 6 次或 12 次. 各水质指标的主要测试方法如下:TN 为过硫酸钾氧化紫外分光光度法,TP 为钼锑抗分光光度法,水温为温度计现场实时测定,Chl-a 为四波段分光光度法[15]. 数据主要统计特征见表 1,TP 的变异系数最大(239.7%),其次是 Chl-a 和 TN,这可能与各指标的年份间差异和季节性差异有关. 各指标数据的 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验,除了水温数据呈正态分布以外,所有指标的数据

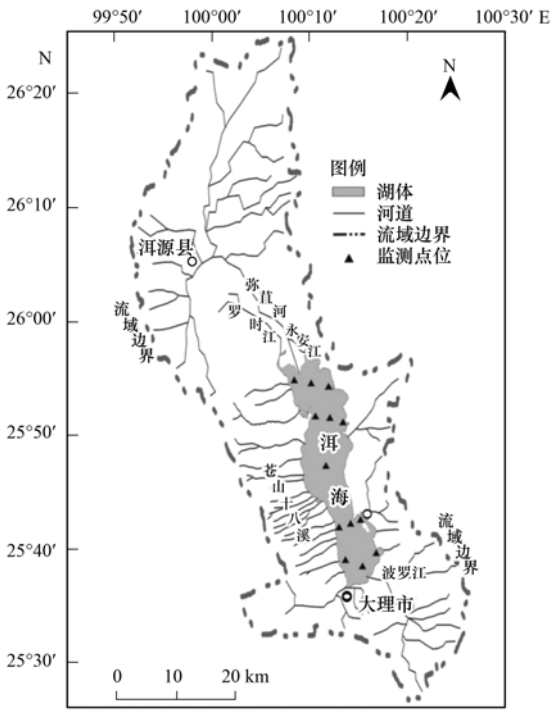


图 1 洱海流域及水质监测点分布示意

Fig. 1 Lake Erhai watershed and water sampling sites

表 1 洱海水温、总氮、总磷及藻类叶绿素 a 的统计值(n = 1 419)

Table 1 Descriptive statistics and normality test of water temperature, TN, TP and algal Chl-a of Lake Erhai recorded between 1991 and 2011

水质指标	单位	平均值	最小值	最大值	中位数	标准差	变异系数/%	K-S 检验	
								Z 统计	P
水温	℃	17.5	0.8	27	17	4.5	25.8	9.895	0.94
TN	$mg \cdot L^{-1}$	0.41	0.01	2.3	0.40	0.22	53.2	9.737	0
TP	$mg \cdot L^{-1}$	0.023	0.001	2.000	0.020	0.056	239.7	2.177	0
Chl-a	$mg \cdot m^{-3}$	8.2	0.1	85.3	5.8	8.6	103.9	6.066	0
TN/TP	无量纲	23	5	80	21	15	64.3	4.534	0

都呈非正态分布.

1.3　分位数回归方法

分位数回归模型(quantile regression)是依据因变量的条件分位数对自变量进行回归,得到所有分位水平的回归模型[16,17].

假设随机变量的分布函数为 $F(y)=\mathrm{Prob}(Y\leqslant y)$,$Y$ 的 τ 分位数为满足 $F(y)\geqslant\tau$ 的最小 y 值:

$$Q(\tau)=\inf\{y:F_Y(y)\geqslant\tau\},\ \tau\in(0,1)$$

$F(y)$的 τ 分位点 $Q(\tau)$由最小化关于 ξ 的目标函数得到:

$$Q(\tau)=\arg\min_{\xi}\left\{\int\rho_\tau(y-\xi)\mathrm{d}F(y)\right\}$$

其中$\rho_\tau(u)$称为检验函数:

$$\rho_\tau(u)=[\tau-I(u<0)]u=\begin{cases}\tau u & u\geqslant 0\\(\tau-1)u & u<0\end{cases}$$

假设因变量 Y 和自变量 X 在 τ 分位的线性函数关系为 $Y=X'\beta+\varepsilon$,给定 $X=x$ 时,Y 的条件分布函数为 $F_Y(y\mid x)$,则 τ 分位数为:

$$Q(\tau\mid x)=\inf\{y:F_Y(y\mid x)\geqslant\tau\},\ \tau\in(0,1)$$

线性条件分位数通常表示为:

$$Q(\tau\mid x)=x'\beta(\tau)$$

分位数回归能在不同的分位数 τ 得到不同的分位函数,残差计算方法不同于最小二乘法,具体如下:

$$\mathrm{Residual}=\min\sum\mid y_i-\hat{y}_i\mid T$$

1.4　数据处理与分析

考虑长时间尺度变化,将 1990 ~ 2013 年的监测数据按照相同年限(6 a)分成 4 组:1990 ~ 1995 年、1996 ~ 2001 年、2002 ~ 2007 年、2008 ~ 2013 年,分别对这 4 组进行三元分位数回归分析. 为分析季节变化,将所有监测数据按春、夏、秋、冬四季分成 4 组,按不同季节分别进行三元分位数回归分析,比较各因子的斜率值变化,并计算 95% 置信区间(CI),CI 覆盖 0(包含 0),表示相关性"不显著",而 CI 未覆盖 0(不包含 0),说明相关性"显著". 为便于比较 3 个因子的斜率值变化,在进行多元分位数回归之前,所有原始数据取对数(lg) 处理.

使用统计软件 STATA V. 12. 0 进行分位数回归分析和参数估计.

2　结果与讨论

2.1　水质指标的年际变化与季节变化

2.1.1　年际变化

从 TN 变化趋势图看,2001 年之前,TN 浓度呈缓慢上升趋势,但总体处于较好的Ⅱ类水质. 在 2001 ~ 2003 年期间有一次跳跃式增长,从Ⅱ类区跨入Ⅲ类区,近 10 年(2003 ~ 2013 年)TN 浓度维持在Ⅲ类水平,达到 2001 年之前浓度水平的近 2 倍[图 2(a)]. TP 浓度年均值的变化趋势表现为有升有降,基本在Ⅱ类水平线上下浮动,浓度高峰出现在 2002 ~ 2004 年区间和 2013 年. 近 10 余年(2002 ~ 2013 年)的 TP 浓度水平比前 10 年(1990 ~ 2001 年)的浓度水平总体高出 15% 左右[图 2(b)]. 洱海的年平均水温在 16 ~ 19℃之间周期性波动,未见明显的上升或下降趋势[图 2(c)].

从藻类 Chl-a 变化趋势看,2000 年之前洱海全湖 Chl-a 维持在低浓度水平,变化范围为 1. 0 ~ 3. 5 $\mathrm{mg\cdot m^{-3}}$. 2000 ~ 2002 的 3 年期间,Chl-a 浓度呈直线上升,藻类生物量从低水平跨越至较高水平. 2003 年之后的 Chl-a 平均浓度达到 2000 年之前的 10 余倍[图 2(d)]. Pearson 相关性分析显示藻类 Chl-a 与 TN 以及水温均呈显著正相关性($P<0.01$),而与 TP 的相关性不显著($P>0.05$).

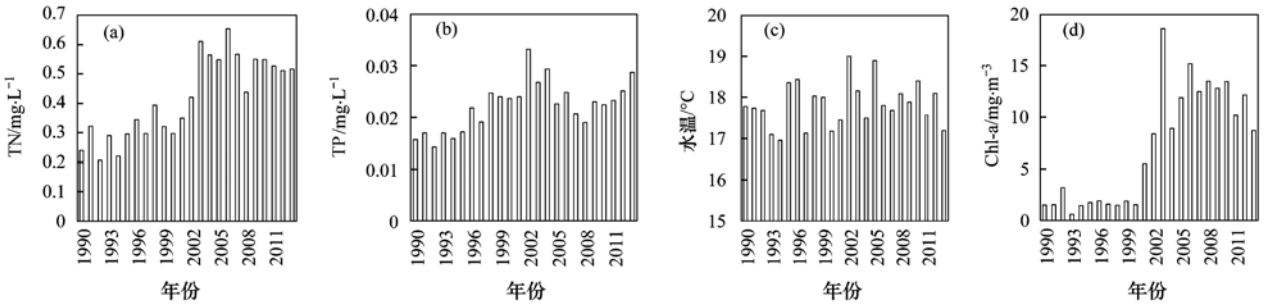


图 2　洱海 TN、TP、水温和藻类 Chl-a 的逐年变化(1990 ~ 2013 年)

Fig. 2　Yearly variation of TN, TP, water temperature, algal Chl-a in Lake Erhai from 1990 to 2013

2.1.2　季节变化

4 项水质指标具有明显的季节性特征,均表现为夏、秋两季较高,且两季数据接近,而春、冬季数值较低. 8 ~ 10 月 TN 浓度最高,5 月是一年中 TN

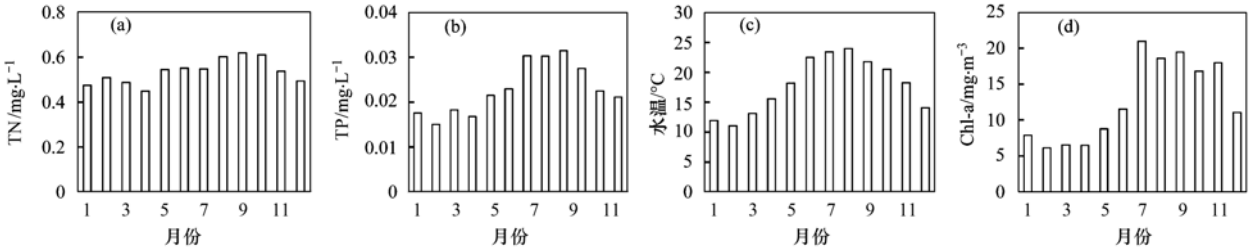


图 3 洱海 TN、TP、水温和藻类 Chl-a 的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of TN, TP, water temperature, algal Chl-a in Lake Erhai

上升的起点,11 月是 TN 开始下降的拐点[图 3(a)]. 一年中 TP 浓度在 4 ~ 7 月是洱海上升速率最快的时段[图 3(b)]. 水温在夏季和秋季最高,分别为 23.3℃和 20.2℃,很适宜藻类生长[图 3(c)]. 藻类 Chl-a 浓度在 6 ~ 7 月出现跳跃式上升,平均值由 10 $mg \cdot m^{-3}$ 跃升至 20 $mg \cdot m^{-3}$,在 7 ~ 11 月维持在最高水平[图 3(d)].

2.2 藻类对氮、磷及水温的长时间尺度响应特征

通过三元分位数回归方法分析洱海 N、P 和水温对藻类 Chl-a 的耦合效应随时间变化特征. 4 个年份区间的 lg(TN)、lg(TP)和 lg(水温)的斜率值随分位点的变化谱图见图 4,斜率值及其 95% 置信区间的统计特征见表 2.

4 个时间段 lg(TN)、lg(TP)和 lg(水温)的平均斜率值变化范围分别为 0.03 ~ 0.20、 - 0.30 ~ 0.80、0.44 ~ 2.70, 3 个因子对藻类的促进效应依次为水温 > 磷 > 氮. 各因子的斜率值随时间变化很大,水温的斜率值逐渐下降,从 1990 ~ 1995 年期间的 2.05 ~ 4.78 快速下降至 2008 ~ 2013 期间的 0.15 ~ 0.75,说明水温对藻类生长的正效应在持续相对下降. 水温斜率的 95% 置信区间(CI)在 2007 年之前的时间段全未覆盖 0,而在 2008 ~ 2013 年期间只有部分区间($0.45 < \tau < 0.71$)未覆盖 0,说明水温与藻类 Chl-a 之间相关性总体表现为极显著,但在 2008 年之后显著度出现下降. 相反,TP 的斜率值逐渐上升,从 1990 ~ 1995 年期间的负值(- 0.42 ~ - 0.05)快速攀升至 2008 ~ 2013 年期间的 0.52 ~ 1.07,说明 P 对藻类生长的正效应逐渐在相对增强. 除了 1996 ~ 2001 年时间段,TP 斜率的 95% CI 在绝大部分位点均是未覆盖 0,说明 TP 与藻类 Chl-a 之间相关性总体呈极显著. 在过去 20 余年中 TN 的斜率值比较低,但在绝大部分分位条件下表现为正效应,在 1996 ~ 2001 年和 2002 ~ 2007 年两个时段的数值略高,而在 2008 ~ 2013 年的正效应达到最低. TN 斜率的 95% CI 只在 1996 ~ 2007 年期间的部分分位点未覆盖 0,说明 TN 与藻类 Chl-a 之间相关显著度较低.

表 2 不同年份区间的多元分位数回归的斜率参数统计[1)]

Table 2 Statistics of all estimated parameters obtained by multivariate QR and OLSR for the three lakes in different periods

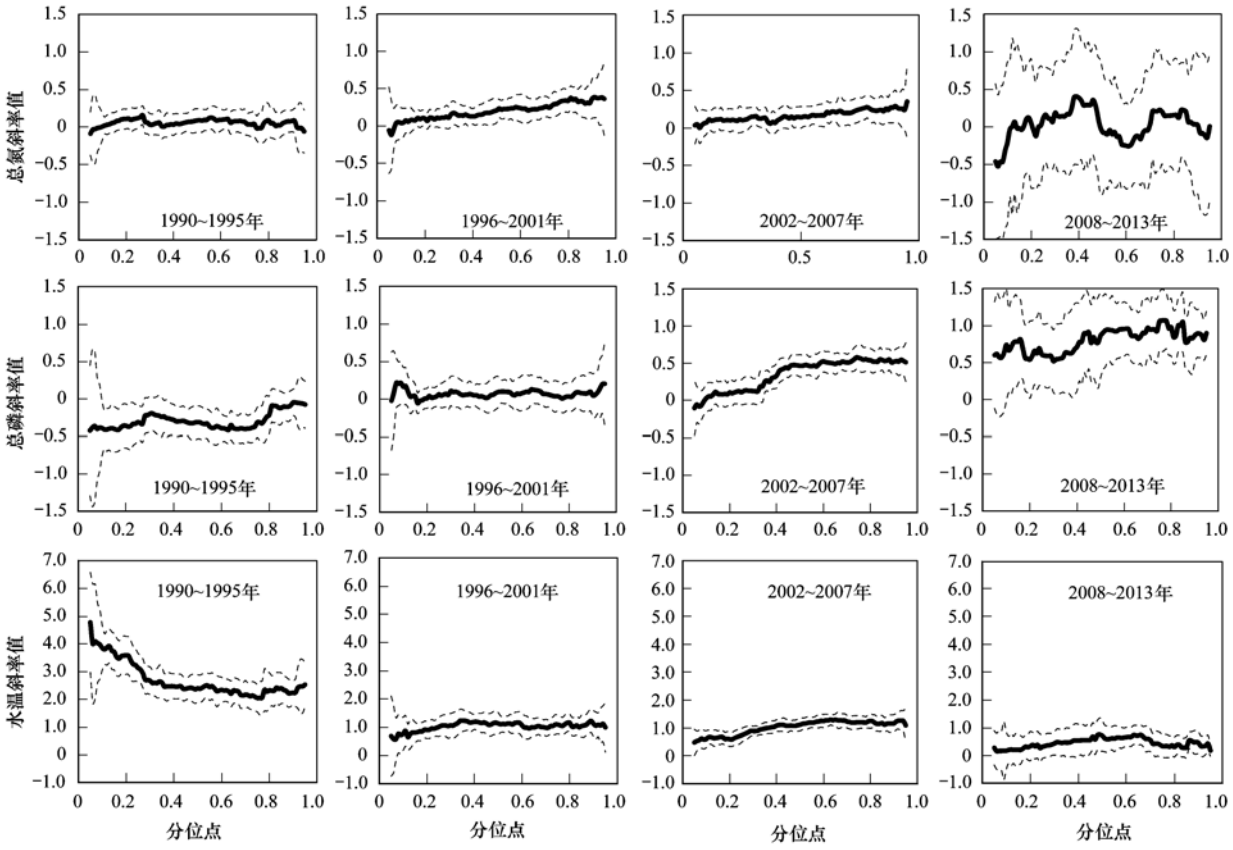
斜率参数	统计量	年份区间			
		1990 ~ 1995	1996 ~ 2001	2002 ~ 2007	2008 ~ 2013
lg(TN)	平均值	0.06	0.20	0.16	0.03
	变化范围	- 0.09 ~ 0.16	- 0.12 ~ 0.39	- 0.00 ~ 0.35	- 0.52 ~ 0.41
	95% 置信区间	(全)覆盖 0	$0.32 < \tau < 0.95$ 未覆盖 0	$0.46 < \tau < 0.92$ 未覆盖 0	(全)覆盖 0
lg(TP)	平均值	- 0.30	0.07	0.35	0.80
	变化范围	- 0.42 ~ - 0.05	- 0.05 ~ 0.22	- 0.10 ~ 0.58	0.52 ~ 1.07
	95% 置信区间	$0.10 < \tau < 0.78$ 未覆盖 0	(全)覆盖 0	$\tau > 0.35$ 未覆盖 0	$\tau > 0.11$ 未覆盖 0
lg(水温)	平均值	2.70	1.04	1.01	0.44
	变化范围	2.05 ~ 4.78	0.58 ~ 1.24	0.48 ~ 1.30	0.15 ~ 0.75
	95% 置信区间	(全)未覆盖 0	(全)未覆盖 0	(全)未覆盖 0	$0.45 < \tau < 0.71$ 未覆盖 0

1)置信区间覆盖 0 表示“不显著”,未覆盖 0 表示“显著”

总体上看,水温和营养物共同支撑着洱海藻类生物量,这与国内外其他富营养化湖泊的研究结果类似[18,19]. 营养物和水温对藻类生物量变化的耦合效应比较复杂,据 1980 ~ 2014 年的洱海陆域大理站气象资料,当地日平均气温、日最高气温以及日最低气温均存在缓慢上升的趋势,近 30 余年日最低气温上升幅度为 0.05℃ · a^{-1},有气候变暖趋势[20]. 而分位数回归结果显示水温是洱海藻类增长的重要限制因素,但其相对重要度随着时间推

移(富营养化程度加重)明显下降,而 P 的相对重要度明显持续上升,P 比 N 对藻类的限制作用更强. 与水温相比,营养盐浓度可能是影响洱海藻类生物量的更重要因素. 这与 Jeppesen 等[21]提出的亚热带到温带区域的 35 个湖泊中浮游藻类生物量与结构主要是由营养物决定,而气候变暖的作用较小的结论基本一致.

分位数回归分析结果显示洱海藻类属于 N、P 共同限制,这与 N/P 比值有关. 一般当 N/P 质量比在 10∶1 ~25∶1的范围时,藻类生长出现氮磷共同限制的概率大[22~24]. 洱海 N/P 质量比值一般在 10 ~30 之间波动,平均值为23,中位数21(表1),符合藻类出现 N、P 共同限制的条件. 藻类 Chl-a 对营养物和水温的响应关系可能与藻类群落结构演替有很大关系. 洱海的富营养化演进过程是藻类群落结构逐渐从硅藻门占优势向蓝藻门占优势的演变过程[25]. 不同藻类对 N、P 和水温的响应程度差别会很大,硅藻的最主要限制因子可能是水温等气象条件,其次是营养盐[26],而蓝藻一般受 N/P 质量比值的影响显著[27,28],还有水温、光照、气压等条件[29]. 洱海 N/P 质量比值现状适合微囊藻、鱼腥藻等蓝藻门在藻类竞争中占优势.



中间实线是参数,上下虚线是95%置信区间,下同

图 4　4 个年份区间的三元分位数回归中 lg(TN)、lg(TP)和 lg(Temp)的斜率变化

Fig. 4　Estimated slopes based on triple quantile regression of lg(Chl-a) vs. lg(TN) & lg(TP) & lg(Temp) in the four periods

2.3　藻类对氮、磷及水温响应的季节性特征

不同季节中 lg(TN)、lg(TP)和 lg(水温)的斜率值随分位点的变化谱图见图 5. 春季,TN 和水温的斜率值均始终保持为正值,两者的 95% CI 在绝大部分分位条件下均未覆盖0(极显著). TP 斜率在大多数条件下(τ <0.85)为负值. 在较高分位时(τ >0.7,Chl-a >5.4 mg·m^{-3}),水温和 TN 的斜率值同时下降,而 TP 斜率值明显相应上升,当 τ >0.85 处(Chl-a >8.0 mg·m^{-3})TP 的斜率值转为正. 这说明 N 和水温是支撑春季藻类生物量的重要因素,但出现高生物量的决定性因子是 P.

夏季,水温的斜率值在所有分位点全部为负值,数值范围为 -2.27 ~0.03,而 TN 和 TP 斜率平均值分别为 0.51 和 0.26,在较高分位时两者的 95% CI 均未覆盖 0(极显著). 当 τ <0.40(Chl-a <3 mg·m^{-3}),TN 斜率持续上升,而 TP 斜率相应下降. 而当 τ >0.40,TN 斜率持续缓慢下降,而 TP 斜率持续快速上升,说明夏季藻类是 N、P 共同限制,但随

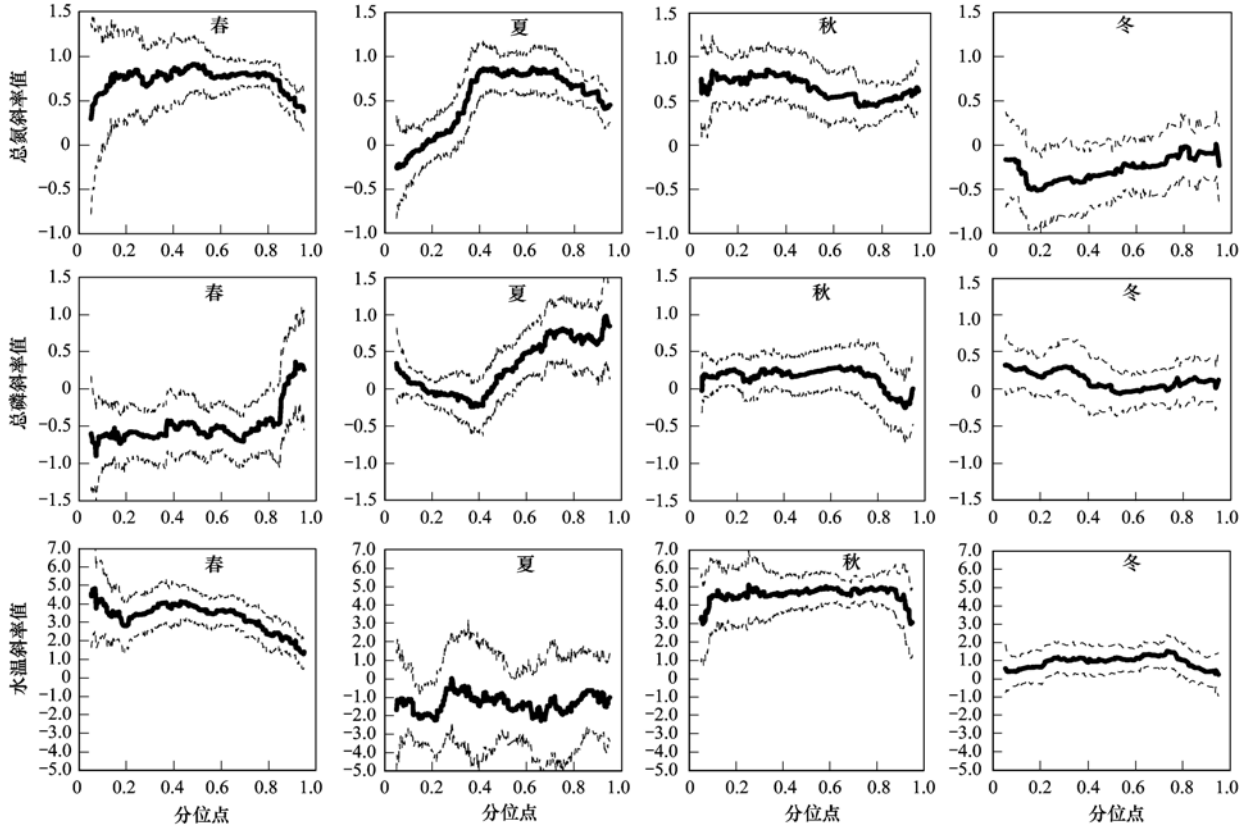


图 5 分季节的三元分位数回归中 lg(TN)、lg(TP)和 lg(Temp)的斜率值变化

Fig. 5 Estimated slopes based on triple quantile regression of lg(Chl-a) vs. lg(TN) & lg(TP) & lg(Temp) for four seasons

着藻类生物量增长,TP 对藻类的正效应逐渐强于 TN.

秋季,TN 和水温的斜率全部为正值,平均值分别为 0.66 和 4.59,两者的 95% CI 在所有分位点都未覆盖 0(极显著). TP 斜率总体是大于 0,平均值 0.16,而 95% CI 在绝大部分分位条件下是覆盖 0(不显著). 秋季藻类增长的限制因子重要度排序为:水温 > TN > TP.

冬季,TN 斜率始终为负值,TP 斜率虽然在绝大部分条件下为正值,但其 95% CI 全覆盖 0(不显著). 温度的斜率始终保持正值,其 95% CI 在绝大部分条件下($0.22 < \tau < 1.52$)未覆盖 0(极显著),说明水温是冬季藻类增长的主导限制因子.

TN、TP、水温、Chl-a 的数值季节性变化表现出高度一致,均是在夏、秋两季达到最高(图 3),这反映了营养物与水温共同促进洱海藻类生物量变化. 但分位数回归结果显示藻类对各因子的响应关系在夏季和秋季完全不同,夏季日平均气温最高,普遍达到藻类生长所需要的最佳温度,因此水温不属于夏季藻类生长的限制因子. 夏季降雨量大,暴雨径流携带更多营养物进入湖体,促进藻类暴发,N、P 成为藻类共同限制因子[30]. 夏季持续高温还会加速下层水中有机物质的耗氧分解,造成溶解氧浓度急剧下降,容易出现缺氧状态,促进底泥中大量氨氮和磷酸盐加快溶出,致使水中 TN、TP 含量升高,支撑全湖藻类出现暴发性增长[31]. 秋季,经过夏季藻类暴发已消耗了大量 N、P,而且秋季气温昼夜温差加大,水温数据的离散度明显大于夏季,藻类生物量对水温变化表现可能更加敏感,使水温成为藻类主要限制因子. 春季和冬季,营养物浓度水平较低,湖水呈相对清洁状态,水温的波动对藻类生物量影响也比较大[32].

洱海藻类群落的季节性特征很明显,在春季以硅藻和蓝藻占优势,冬季以绿藻和蓝藻占优势,而蓝藻在全年绝大部分时间占优势,尤其是在夏秋两季处于绝对优势地位,水华发生时蓝藻数量高达 10^7 cells·L^{-1}[25]. 夏季水温能普遍达到蓝藻生长最理想水温(20℃以上),营养物浓度则成为藻类生物量的决定性因子[33].

3 结论

(1)过去 20 余年,洱海富营养化程度持续加

剧，TN、TP 和 Chl-a 在 2001 ~2003 期间出现跳跃式增长，2003 年后的 TN 平均浓度达到 2001 年之前浓度水平的近 2 倍，TP 浓度水平比 2001 年之前的浓度水平总体高出 15%，Chl-a 平均浓度达到 2001 年之前的 10 余倍. 4 项水质指标具有明显的季节性特征，均表现为夏、秋两季较高，且两季数据接近，而春、冬季数值较低.

(2)在长时间变化方面，洱海藻类生物量受水温、N、P 的共同限制作用，但随着洱海富营养化程度的加剧，水温对藻类生物量的相对重要度在持续下降. 营养物对藻类的促进效应在相应提升，尤其是 TP 对藻类的相对重要度持续攀升. TN 对藻类生物量整体表现为较稳定的正效应，但在 2008 ~2013 年 TN 对藻类正效应达到最低. 1995 年后，N 逐渐取代水温很大部分对藻类的限制作用；2002 之后，P 又逐渐取代 N 成为最重要的营养物限制因子.

(3)在季节方面，春季和秋季以水温和 N 的共同限制为主导，但春季当 Chl-a >8 $mg\cdot m^{-3}$时，N 和水温对藻类的正效应逐渐被 P 取代. 夏季完全以 N、P 共同限制效应占主导，当 Chl-a >3 $mg\cdot m^{-3}$时，TP 的正效应逐渐超过 TN，冬季则以 P 和水温的共同限制效应为主导.

(4)在气候变暖的大背景下，洱海富营养化控制应采取“控 P”为主和 N、P 协同削减的策略. 当前富营养化控制过程中，应着重监控春、秋两季温度短期快速上升可能引发的全湖藻华风险，作好监测与预测工作.

参考文献：

[1] 金相灿. 湖泊富营养化研究中的主要科学问题——代“湖泊富营养化研究”专栏序言[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(1): 21-23.
Jin X C. The key scientific problems in lake eutrophication studies[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(1): 21-23.

[2] Jung S W, Joo H M, Kim Y O, *et al*. Effects of temperature and nutrient depletion and reintroduction on growth of *Stephanodiscus hantzschii* (Bacillariophyceae): implications for the blooming mechanism[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2011, **26**(1): 115-121.

[3] Symons C C, Arnott S E, Sweetman J N. Nutrient limitation of phytoplankton communities in subarctic lakes and ponds in Wapusk National Park, Canada[J]. Polar Biology, 2012, **35**(4): 481-489.

[4] Fragoso Jr C R, Marques D M L M, Ferreira T F, *et al*. Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, **26**(11): 1337-1348.

[5] 苏洁琼, 王烜, 杨志峰. 考虑气候因子变化的湖泊富营养化模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(11): 3197-3206.
Su J Q, Wang X, Yang Z F. Lake eutrophication modeling in considering climatic factors change: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(11): 3197-3206.

[6] 吴功果, 倪乐意, 曹特, 等. 气候变暖和营养水平对洱海浮游植物的长期影响(1980-2009 年)[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(2): 209-212.
Wu G G, Ni L Y, Cao T, *et al*. Warming and nutrients affect the growth of phytoplankton in Lake Erhai over the period of 1980-2009[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(2): 209-212.

[7] 董静, 高云霓, 李根保. 淡水湖泊浮游藻类对富营养化和气候变暖的响应[J]. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 615-623.
Dong J, Gao Y N, Li G B. A review: responses of phytoplankton communities to eutrophication and climate warming in freshwater lakes[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, **40**(3): 615-623.

[8] 李小平, 程曦, 陈小华. 淀山湖营养物输入响应关系的分位数回归分析[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(2): 324-329.
Li X P, Cheng X, Chen X H. A quantile regression for relationship between nutrient input and response of Dianshan Lake[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(2): 324-329.

[9] Planque B, Buffaz L. Quantile regression models for fish recruitment-environment relationships: four case studies [J]. Marine Ecology Progress Series, 2008, **357**: 213-223.

[10] Chen X H, Li X P. Using quantile regression to analyze the stressor-response relationships between nutrient levels and algal biomass in three shallow lakes of the Lake Taihu Basin, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, **59**(28): 3621-3629.

[11] Friederich P, Hense A. Statistical downscaling of extreme precipitation events using censored quantile regression [J]. Monthly Weather Review, 2007, **135**(6): 2365-2378.

[12] Fleeger J W, Johnson D S, Carman K R, *et al*. The response of nematodes to deep-sea CO_2 sequestration: a quantile regression approach [J]. Deep Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 2010, **57**(5): 696-707.

[13] Ebru Ç, Eban A. Determinants of house prices in Istanbul: a quantile regression approach[J]. Quality & Quantity, 2011, **45**(2): 305-317.

[14] 韩涛, 彭文启, 李怀恩, 等. 洱海水体富营养化的演变及其研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(1): 71-73, 78.
Han T, Peng W Q, Li H E, *et al*. Evolution of eutrophication in the Erhai Lake and its relevant research progress[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, **3**(1): 71-73, 78.

[15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 50-70.
The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method [M]. (4th ed.). Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 50-70.

[16] Cade B S, Terrell J W, Schroeder R L. Estimating effects of limiting factors with regression quantiles[J]. Ecology, 1999, **80**(1): 311-323.

[17] Cade B S, Noon B R. A gentle introduction to quantile regression for ecologists[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2003, **1**(8): 412-420.

[18] Paerl H W, Huisman J. Blooms like it hot[J]. Science, 2008,

320(5872): 57-58.

[19] Ye C, Shen Z M, Zhang T, *et al*. Long-term joint effect of nutrients and temperature increase on algal growth in Lake Taihu, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(2): 222-227.

[20] 陈小华. 富营养化初期湖泊(洱海)的环境演变及营养物基准/标准研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015. 56-100.
Chen X H. Study on the recent 20-year eutrophication process and development of nutrient criteria/standards of Lake Erhai at its initial stage of eutrophication[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015. 56-100.

[21] 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.

[22] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, *et al*. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2007, **10**(12): 1135-1142.

[23] Wang H J, Liang X M, Jiang P H, *et al*. TN: TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes[J]. Freshwater Biology, 2008, **53**(5): 935-944.

[24] 陈建良, 胡明明, 周怀东, 等. 洱海蓝藻水华暴发期浮游植物群落变化及影响因素[J]. 水生生物学报, 2015, **39**(1): 24-28.
Chen J L, Hu M M, Zhou H D, *et al*. Studies on population dynamics and the underlying impact factors of phytoplankton during the cyanobacteria bloom in Lake Erhai[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, **39**(1): 24-28.

[25] 胡竹君, 李艳玲, 李嗣新. 洱海硅藻群落结构的时空分布及其与环境因子间的关系[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 400-408.
Hu Z J, Li Y L, Li S X. Spatial and temporal distributions of diatom communities and their relationships with environmental factors in Lake Erhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(3): 400-408.

[26] 孟顺龙, 裘丽萍, 胡庚东, 等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1438-1444.
Meng S L, Qiu L P, Hu G D, *et al*. Effect of nitrogen and phosphorus ratios on growth and competition of two blue-green algae[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(7): 1438-1444.

[27] 王菁, 裘丽萍, 孟顺龙, 等. 氮磷比对鱼腥藻和普通小球藻生长竞争的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, **42**(5): 316-320.

[28] 李小平. 蓝藻运动与水华早期预防和控制[J]. 自然杂志, 2008, **30**(5): 280-286.
Li X P. Cyanobacteria movements and its bloom control[J]. Chinese Journal of Nature, 2008, **30**(5): 280-286.

[29] May L, Spears B M, Dudley B J, *et al*. The importance of nitrogen limitation in the restoration of Llangorse Lake, Wales, UK[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2010, **12**(1): 338-346.

[30] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 2003, **506**(1-3): 135-145.

[31] Wang Y C, Wang Z C, Wu W J, *et al*. Seasonal regime shift of an alternative-state Lake Xingyun, China[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2010, **19**(8): 1474-1485.

[32] 王芸. 洱海夏秋季蓝藻种群动态变化及水华成因分析[J]. 大理学院学报, 2008, **7**(12): 39-42.
Wang Y. Study on the group development of cyanophyta and the cause of alga bloom in Erhai Lake in summer and autumn[J]. Journal of Dali University, 2008, **7**(12): 39-42.

[33] Burge K, Breen P F. Detention time design criteria to reduce the risk of excessive algal growth in constructed water bodies[A]. In: Proceedings of the 7th International Conference on Urban Drainage Modelling and the 4th International Conference on Water Sensitive Urban Design[C]. Melbourne: Monash University, 2006. 5-15.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 1

Jan. 15, 2017

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter ····· ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, *et al.* (1)

Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event ····· JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, *et al.* (13)

Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of $PM_{2.5}$ Concentration Based on GAM Model ····· HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)

Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume ····· LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, *et al.* (33)

Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer ····· ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, *et al.* (41)

Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH_4 and CO_2 in a Brackish Marsh Dominated by *Cyperus malaccensis* and *Phragmites australis* During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary ····· TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, *et al.* (52)

Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO_2 and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China ····· ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, *et al.* (60)

Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake ····· CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, *et al.* (70)

Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake ····· HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, *et al.* (78)

Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil ····· ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)

Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake ····· QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, *et al.* (95)

Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou ····· YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, *et al.* (104)

Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression ····· CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, *et al.* (113)

Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir ····· YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)

Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir ····· FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, *et al.* (129)

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area ····· HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, *et al.* (138)

Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed ····· JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, *et al.* (147)

Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes ····· JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, *et al.* (156)

Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake ····· ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, *et al.* (162)

Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake ····· ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, *et al.* (170)

Effects of pH and Complexing Agents on Sb(Ⅴ) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface ····· WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, *et al.* (180)

Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms ····· WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, *et al.* (188)

Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment ····· AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, *et al.* (195)

Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater ····· GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, *et al.* (201)

Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique ····· ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, *et al.* (212)

Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent ····· WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, *et al.* (220)

Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe^{2+})-Ozonation Process ····· XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, *et al.* (229)

Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors ····· WANG Han, FANG Fang, LI Kai, *et al.* (238)

Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration ····· ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, *et al.* (247)

Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis ····· LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, *et al.* (253)

Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification ····· JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, *et al.* (260)

Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules ····· WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, *et al.* (269)

Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization ····· ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, *et al.* (276)

Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis ····· WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, *et al.* (283)

Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by *Pseudomonas aeruginosa* ····· SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)

Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain ····· SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, *et al.* (301)

Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing ····· LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, *et al.* (309)

Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibahe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi ····· LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, *et al.* (318)

Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China ····· LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, *et al.* (327)

Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Soil Active Organic Carbon ····· ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, *et al.* (333)

Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice ····· TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, *et al.* (343)

Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress ····· CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, *et al.* (352)

Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition ····· GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, *et al.* (361)

Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(Ⅵ) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring ····· LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, *et al.* (368)

Cd(Ⅱ) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(Ⅱ) Polluted Soil Remediation ····· HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, *et al.* (374)

Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River ····· HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, *et al.* (382)

Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou ····· CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, *et al.* (389)

Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors ····· YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, *et al.* (399)

Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants ····· YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, *et al.* (405)

Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution ····· ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, *et al.* (412)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

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

赵进才　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）

2017 年 1 月 15 日　第 38 卷　第 1 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 38　No. 1　Jan. 15, 2017

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	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	**Printed**	by Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 （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：140.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行

ISSN 0250-3301