

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洵, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)	

湿地水环境健康评价方法及案例分析

李玉凤, 刘红玉*, 郝敬锋, 郑囡, 曹晓

(南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210046)

摘要: 水环境健康是湿地生态系统健康的基础. 从水环境状态健康和过程健康两方面对水环境健康进行评价研究, 其中水环境状态健康主要由水文和水质条件体现, 水环境过程健康主要由水环境弹性、稳定性和恢复力体现. 基于以上理论, 并以西溪湿地公园作为案例, 利用该区 2009 年 3 月~2010 年 3 月的水环境月监测数据对水环境健康进行分析. 结果表明, ①西溪湿地水环境健康季节性变化明显, 其中, 冬季水环境健康指数最低(37.35), 处于不健康状态, 夏季水环境健康指数最高(46.36), 处于亚健康状态; ②西溪湿地公园中水塘和河溪水环境健康程度各异, 总体而言, 水塘水环境健康程度优于河溪水环境, 水塘水环境健康指数为 42.72, 河溪水环境健康指数为 37.99; ③西溪湿地公园的水环境整体处于亚健康状态, 水环境健康指数为 53.80. 由此可见, 冬季改善河溪水环境是提高西溪湿地公园水环境健康的有效途径.

关键词: 水环境健康; 水环境状态; 水环境过程; 评价模型; 西溪湿地公园

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0346-06

A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health

LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, ZHENG Nan, CAO Xiao

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Water is the basis of wetland, the degree of water health directly determines the function of wetland ecosystem. The theory and method of water health were established in the study. Water health included both water status health and water process health. Water status health was reflected by hydrologic condition and water quality. Water process health was calculated by water elasticity, water stability and resilience. Xixi Wetland Park was taken as the case study. The results indicated that: ① Seasonal variations of water health were apparent in Xixi Wetland. Water health index was the highest (46.36) and stayed under the sub-health condition in summer. In contrast, water health index was the lowest (37.35) and unhealthy in winter; ② the degrees of water health were obviously different between ponds and creeks. Water health index in ponds was 42.72, which was higher than that of creeks (37.99); ③ Water in Xixi Wetland Park was sub-health with 53.80 as its water health index. Based on the result of study, to enhance water health of creeks in winter is an effective measure to improve water health in Xixi Wetland Park.

Key words: water health; water status health; water process health; assessment model; Xixi Wetland Park

水是湿地生态系统基本要素和重要特征之一, 是湿地物质循环和能量流动的重要载体. 湿地水环境的健康状态直接影响到湿地生态系统的健康状况. 因此, 开展湿地水环境健康研究是反映湿地生态系统健康与否的关键点. 目前, 在湿地生态系统健康的评价方面, 已经提出了许多评价指标和方法, 如生物完整性指数法^[1]、压力-状态-响应指标法^[2]等. 然而, 由于缺乏详尽的基础数据, 生态系统健康评价的结果各有侧重, 缺乏可比性. 本研究仅对湿地生态系统中的水环境健康进行评价. 近年来, 关于湿地水环境健康的研究已取得了一定的进展, 主要集中在 2 个方面: 一是对水环境状态健康的研究, 主要是基于水质数据对水环境的状况进行评价^[3,4]; 二是对水环境周期性变化情况的研究, 大部分旨在揭示水环境的变化过程^[5,6], 对其定量评价的研究较少. 本研究根据水环境多稳态的变化特征, 从水环境的状

和过程两方面入手, 构建水环境健康评价理论, 并以西溪湿地公园作为案例, 揭示其水环境健康状况, 以期公园的保护和利用提供新的思路.

1 水环境健康的内涵

近年来, 湿地生态系统健康研究日益受到重视, 并且取得一定研究进展. 但是多数研究强调的是生态系统健康状态的判断和评价^[7], 缺乏对其过程的跟踪和监测, 从而导致健康评价缺乏完整性和预测性. 湿地水环境健康不仅包含对水环境状态的健康诊断, 而且还要根据过程监测的结果对水环境过程

收稿日期: 2011-04-07; 修订日期: 2011-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871084); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目; 南京师范大学研究生科研创新计划项目

作者简介: 李玉凤(1985~), 女, 讲师, 主要研究方向为湿地景观生态学, E-mail: pandalee_0826@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lhy8589@163.com

的变化进行健康评价. 具体而言, 湿地水环境健康的内涵主要有 2 个方面. 首先, 由于水环境具有多稳态的特征^[8], 湿地水环境健康还应该注重其系统内部组分所处的状态特征, 即判断水环境处于何种稳态, 这种稳态是否处于健康的状态. 其中包括水文、水质、水生物等问题, 同时还需考虑水环境要素的内在关联性. 其次, 水环境在时间变化过程中能够保持其弹性、稳定性和恢复性的能力^[9], 即判断水环境过程的健康状况. 在一定的时空尺度内水体对各种扰动(包括湿地面积、水量及水质的改变, 湿地旅游业的开发以及外来物种的侵入等)保持其弹性、平衡性和稳定性的能力, 这是研究湿地水环境过程健康必须要解决的问题.

2 水环境健康评价模型的设计

2.1 水环境状态健康模型的设计

水环境状态健康(ESHI)选择水文指标(水深 D)、水质指标(包括总氮 TN 和总磷 TP)和水生物指标(浮游植物生物量 BA)3 个方面来评价水环境状态健康. 该方法把所选指标分为基础指标、基准指标和扩展指标. 其中 D 是水环境健康的基础要素, 也就是基础指标, TN、TP 是基准指标, BA 是扩展指标. 基础指标是湿地存在的基础, 如水深、水位等水文指标; 基准指标是水环境健康评价的关键指标, 单独使用时, 基本上能够反映水环境的健康状况, 如 TN、TP 等水环境物化指标; 扩展指标是指基准指标之外的一些指标, 它们能对基准指标的评价结果在生物及生态系统等方面进行修正, 以使评价结果更加全面.

(1) 基础指标水深 D 的状态健康分指数的计算

水深是湿地水文条件的基础, 也是湿地水环境健康的基本条件. 基本水深是根据监测周期内水位变化的最大幅度确定的. 若湿地的平均水深小于基本水深, 该湿地水环境处于不健康的状态, 即水深成为水环境状态健康的限制因子. 若湿地的平均水深大于基本水深, 则水质和水生物指标成为水环境状态健康的限制因子(图 1). 因此对于低于基本水深的湿地采用下列对数级差规格化公式计算水深分指数[ESHI(D)], 公式(1)表明水深越大, 其分指数就越大:

$$ESHI(D) = 100 \times \frac{\ln C_{Dx} - \ln C_{Dmin}}{\ln C_{Dmax} - \ln C_{Dmin}} \quad (1)$$

式中, ESHI(D) 为基准指标 D 的 ESHI 分指数; C_{Dx} 为 D 的实测值, C_{Dmax} 、 C_{Dmin} 分别为实测最高水深和

最低水深.

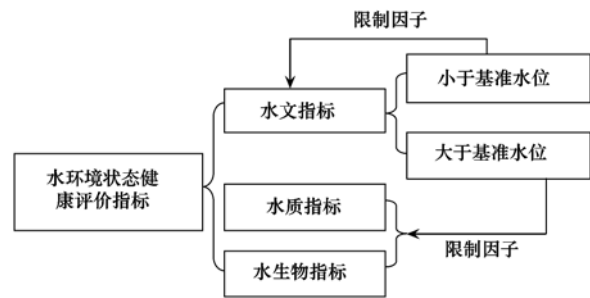


图 1 水环境状态健康评价框架示意

Fig. 1 Sketch map of ESHI

(2) 基准指标 TN、TP 的状态健康分指数的计算
西溪湿地公园样点中 TN 符合正态分布^[10], 同时, 水中 TN 浓度越大, 其健康分指数就越低, 因此, 可采用下列对数级差规格化公式计算 ESHI(TN):

$$ESHI(TN) = 100 \times \frac{\ln c_{TNmax} - \ln c_{TNx}}{\ln c_{TNmax} - \ln c_{TNmin}} \quad (2)$$

式中, ESHI(TN) 为基准指标 TN 的 ESHI 分指数; c_{TNx} 为 TN 的实测值; c_{TNmin} 和 c_{TNmax} 分别是对应于 ESHI(TN) 为 100 和 0 时的 TN 的实测值. 式(2)化简后, 可得到如下计算 ESHI(TN) 的公式:

$$ESHI(TN) = 10 \times (a + b \ln c_x) \quad (3)$$

式中, a 、 b 是由 c_{TNmin} 和 c_{TNmax} 所确定的常数. 计算公式如下:

$$\begin{cases} a = 10 \times \frac{\ln c_{TNmax}}{\ln c_{TNmax} - \ln c_{TNmin}} \\ b = -10 \times \frac{1}{\ln c_{TNmax} - \ln c_{TNmin}} \end{cases} \quad (4)$$

根据西溪湿地 79 个采样点实测 TN 数据, 式中, $c_{TNmin} = 0.34 \text{ mg/L}$, $c_{TNmax} = 12.92 \text{ mg/L}$. 代入式(4), 求得: $a = 7.03427$, $b = -2.74907$. 将 a 、 b 代入公式(3), 可得到西溪湿地 ESHI(TN) 的计算公式如下:

$$ESHI(TN) = 10[7.03427 - 2.74907 \ln(TN)] \quad (5)$$

由公式(5)可见, 基准指标 TN 经过对数级差规格化公式转换以后可以得到 ESHI(TN). 利用上述方法计算 ESHI(TP), 对 TP 转换后得到:

$$ESHI(TP) = 10[0.00149 - 2.97994 \ln(TP)] \quad (6)$$

(3) 扩展指标 BA 的状态健康分指数的计算

已有研究表明浮游植物生物量与叶绿素 a (mg/m^3) 之间存在如下关系^[11]:

$$BA(\text{mg/L}) = 7.557 + 0.327 \text{Chla} \quad (7)$$

经分析可知,西溪湿地中 BA 与 TN 和 TP 都具有显著的正相关关系,通过回归分析确定其关系式如下:

$$\ln(\text{TN}) = 0.073\text{BA} - 0.386 \quad (8)$$

$$(n = 79, R = 0.774^{**}, P < 0.01)$$

$$\ln(\text{TP}) = 0.084\text{BA} - 3.394 \quad (9)$$

$$(n = 79, R = 0.813^{**}, P < 0.01)$$

根据基准公式(5)式和(6)式,同时结合(8)式和(9)式,可得到扩展指标 BA 的水环境状态健康分

$$\text{ESHI} = \begin{cases} \frac{\text{ESHI}(D)}{100} [\omega_{\text{TN}} \cdot \text{ESHI}(\text{TN}) + \omega_{\text{TP}} \cdot \text{ESHI}(\text{TP}) + \omega_{\text{BA}} \cdot \text{ESHI}(\text{BA})] \\ \omega_{\text{TN}} \cdot \text{ESHI}(\text{TN}) + \omega_{\text{TP}} \cdot \text{ESHI}(\text{TP}) + \omega_{\text{BA}} \cdot \text{ESHI}(\text{BA}) \end{cases} \quad (12)$$

式中,ESHI 为水环境状态健康指数; ω 表示各指标的权重,本研究利用相关加权指数法确定各因子的权重^[12].当 $\text{ESHI}(D) < 100$ 时, D 成为水环境状态健康的主要限制因子,应该考虑 $\text{ESHI}(D)$ 对 ESHI 的影响;当 $\text{ESHI}(D) \geq 100$ 时,水环境状态健康的限制因子转变为水质和水生物,此时 $\text{ESHI}(D)$ 对 ESHI 没有影响.

2.2 水环境过程健康评价模型的设计

(1) 水环境弹性分指数 (EEI) 的构建

水环境健康弹性指水环境健康状态随时间变化的波动幅度^[13].本研究利用变异系数表示水环境健康弹性 (EEI),它是描述变量相对其均值变化程度的统计量:

$$C_v = \frac{S}{\overline{\text{ESHI}}} \quad (13)$$

式中, C_v 表示水环境状态健康指数 ESHI 的变异系数, S 表示其标准差, $\overline{\text{ESHI}}$ 表示其均值,是由水环境状态健康指数 ESHI 的一组计算值 (时间序列 y_i , $i = 1, 2, \dots, n$) 平均而得.为了消除符号所引起的差异,令

$$\text{EEI} = |C_v| = \left| \frac{S}{\overline{\text{ESHI}}} \right| \quad (14)$$

即用 EEI 来度量水环境状态健康指数 ESHI 的变化程度.

(2) 水环境稳定性分指数 (ESI) 的构建

研究水环境健康的稳定性,应选水环境状态健康指数作为度量对象.而水环境状态健康的变化程度受水体富营养化的影响^[13].水环境健康弹性表明水体健康状态在一段时间内的变化程度,其稳定性必须考虑影响其变化的诸因子的变化幅度.只根据 C_v 值判定水环境健康的弹性,不能更好地反映水环境过程的健康^[14,15].更为精确地度量应该将影响水环境过程健康的水体富营养化的变化幅度考虑在

指数 $\text{ESHI}(\text{BA})_1$ 和 $\text{ESHI}(\text{BA})_2$ 的计算公式^[3]:

$$\text{ESHI}(\text{BA})_1 = 10[7.03427 - 2.74907(0.073\text{BA} - 0.386)] \quad (10)$$

$$\text{ESHI}(\text{BA})_2 = 10[0.00149 - 2.97994(0.084\text{BA} - 3.394)] \quad (11)$$

(4) 水环境状态健康指数 (ESHI) 的计算

综合上述分指标计算结果,水环境状态健康指数计算公式如下:

内.对于水环境稳定性,有必要提出一个能综合表示水环境稳定性的概念,即水环境稳定性指数 (environmental stability index, ESI),其定义如下:

$$\text{ESI} = \frac{\text{水环境营养状态变动率}}{\text{水环境状态健康变动率}}$$

它表示一定的营养状态情况下,水环境健康状态变化对营养状态变动的响应程度.其计算公式为:

$$\text{ESI} = -\frac{\Delta\text{TSI}/\text{TSI}}{\Delta\text{ESHI}/\text{ESHI}} = -\frac{\Delta\text{TSI}}{\Delta\text{ESHI}} \times \frac{\text{ESHI}}{\text{TSI}} \quad (15)$$

需要指出的是,TSI 表示水体的富营养化指数,计算公式见参考文献[5].水环境健康状态与营养状态是成反方向变动的,即 $\Delta\text{TSI}/\Delta\text{ESHI}$ 为负值.若 ESI 取负值,表示水环境健康向负方向发展,较正值更缺乏稳定性,水环境健康可能受到强烈的外界影响,也有可能走向崩溃.水环境健康稳定性越大,水环境健康状态对营养状态的变化反应程度越小,也即水环境健康对于营养状态的变化反应越不灵敏,在面对外界营养物质胁迫时,保持水环境结构和组成的能力越强.

(3) 水环境恢复力分指数 (ERI) 的构建

对于一般湿地类型而言,水体的富营养化成为水体健康的干扰因素,直接影响到湿地自然和社会功能的发挥.因此,特定时空尺度上湿地水环境恢复力大小取决于水体富营养化对水环境健康状态的敏感程度和胁迫压力的变化情况^[16].综上所述,湿地水环境恢复力 (ERI) 的计算方法如下:

$$\text{ERI} = \frac{\Delta\text{ESHI}}{\text{TSI}} \quad (16)$$

由式(16)可见,水环境恢复力在富营养化程度的胁迫下,水环境健康作为敏感指数会发生改变.在富营养化程度一定的条件下,若水环境健康指数随着水体监测时间的变化而下降,说明水体的恢复力在富

营养化程度的牵制下减低,此时 ERI 为负值,反之水体的恢复力没有受到富营养化的胁迫,ERI 为正值.

(4) 水环境过程健康模型的构建

在水环境弹性、稳定性和恢复力分指数研究和计算的基础上,利用相关加权指数法对各水环境过程分指数确定权重^[12],最后对之加权平均得到水环境过程健康指数(EPHI).

2.3 水环境健康综合评价模型的设计

水环境健康是对水环境状态健康和过程健康的综合.水环境状态健康从水文和水质两方面进行评价,而水环境过程健康从弹性、稳定性和恢复力这 3 个方面对其进行评价.弹性、稳定性和恢复力是 3 个相互关联,但都各有侧重的指标,对其概念和内容的研究尚未形成统一.本研究的弹性指数主要是度量水环境状态指数的变化程度的指标,而稳定性指标则是在此基础上,考虑其影响制约因素,判断水环境状态在影响因素作用下的稳定性.恢复性指数则是通过分析水环境状态变化的大体趋势探讨其恢复能力.

根据生态系统多稳态理论及其健康的理论和方法,在水环境状态健康评价的基础上,利用水环境过程指数进行修正^[13],构建水环境健康指数模型(environmental health index, EHI).其模型及计算公式如下:

$$EHI = ESHI \times EPHI \quad (17)$$

3 西溪湿地公园水环境健康评价

3.1 研究区概况及样点监测

本研究选择西溪湿地公园作为应用实例,该湿地公园位于杭州市的西部,距西湖不到 5 km,与城市关系密切.2005 年西溪湿地被确定为第一个“国家湿地公园”,2009 年经《湿地公约》秘书处批准,又被正式列入国际重要湿地名录.该城市湿地公园的总面积为 11.5 km².西溪湿地公园景观以网状河流和“鱼鳞状”水塘镶嵌为特征^[17],水域面积占整个面积的 46%.

对西溪湿地进行水质监测,时间为 2009 年 3 月~2010 年 3 月的每月月底.共设采样点 79 个,其中包括 49 个河溪样点和 30 个水塘样点.水样采集表层 50 cm 的水,每次采样时间持续 3 d.水环境监测指标包括水深(D)、透明度(SD)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数和叶绿素 a(Chla).

3.2 西溪湿地公园水环境基本特征

西溪湿地公园水体的基本特征见表 1,总体看来水塘的水环境优于河溪的水环境.通过 ANOVN 分析表明水塘和河溪水环境差异明显.水塘的平均水深不到河溪平均水深的一半,季节性变化也各异;水塘的平均 SD 大于河溪的 SD,两者的 SD 都在冬季最大;水塘 TN 的年平均值为 1.48 mg/L,河溪的 TN 年平均值为 2.79 mg/L,水塘和河溪在冬季的 TN 浓度最高;水塘和河溪中 TP 年平均浓度差异不明显,但是其季节性变化较大,水塘中 TP 浓度在秋季最高,但是河溪中 TP 浓度在夏季最高;水塘中高锰酸盐指数的浓度高于河溪中高锰酸盐指数的浓度,但是 2 种类型水体中高锰酸盐指数的浓度都在夏季最大;水塘中 Chla 的浓度明显低于河溪中 Chla 的浓度,且都在夏季达到最高浓度.

表 1 西溪湿地公园水环境基本特征

Table 1 Basic characteristics of water environment for Xixi Wetland Park						
水体	指标	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
水塘	D/m	0.65 ± 0.20	0.56 ± 0.18	0.59 ± 0.16	0.67 ± 0.15	0.62 ± 0.20
	SD/m	0.61 ± 0.24	0.52 ± 0.19	0.66 ± 0.24	0.77 ± 0.28	0.65 ± 0.21
	TN/mg · L ⁻¹	1.30 ± 1.18	1.21 ± 1.01	1.48 ± 1.08	1.99 ± 1.84	1.48 ± 1.13
	TP/mg · L ⁻¹	0.12 ± 0.15	0.15 ± 0.20	0.11 ± 0.08	0.10 ± 0.01	0.15 ± 0.10
	高锰酸盐指数/mg · L ⁻¹	7.48 ± 3.67	8.83 ± 5.82	7.53 ± 4.09	6.25 ± 2.61	7.46 ± 3.28
	Chla/mg · m ⁻³	15.92 ± 20.66	22.66 ± 26.18	12.32 ± 13.46	10.58 ± 8.54	15.01 ± 13.04
河溪	D/m	1.38 ± 0.58	1.34 ± 0.64	1.44 ± 0.50	1.52 ± 0.45	1.42 ± 0.49
	SD/m	0.43 ± 0.12	0.46 ± 0.16	0.53 ± 0.20	0.64 ± 0.22	0.51 ± 0.15
	TN/mg · L ⁻¹	2.77 ± 1.62	2.23 ± 1.98	2.61 ± 0.89	3.53 ± 1.34	2.79 ± 1.70
	TP/mg · L ⁻¹	0.13 ± 0.11	0.16 ± 0.12	0.11 ± 0.11	0.12 ± 0.07	0.13 ± 0.12
	高锰酸盐指数/mg · L ⁻¹	6.50 ± 1.66	6.82 ± 2.66	5.15 ± 1.68	4.54 ± 1.46	5.81 ± 2.00
	Chla/mg · m ⁻³	26.87 ± 20.52	34.12 ± 27.38	15.37 ± 15.89	8.23 ± 9.8	21.15 ± 15.00

3.3 西溪湿地公园水环境健康分级标准

按照文献[18]的标准可见,西溪湿地公园大部

分水体水质处于Ⅳ类和劣Ⅳ类.为了能够详细地度量湿地水环境健康状态,本研究设计了一个 0~100

连续数值的水环境健康指数,并定义当 ESHI/EHI 为 0 时,健康状态最差;当 ESHI/EHI 为 100 时,健康状态最好. 为便于描述,将 0 ~ 100 的连续数值按间隔 20 从小到大分为 5 段,即:0 ~ 20、20 ~ 40、40

~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100,分别对应于疾病、不健康、亚健康、健康和很健康这 5 种健康状态. 根据上述各指标的水环境健康分指数计算公式,可得到西溪湿地水环境有关指标的分级标准(表 2).

表 2 西溪湿地水环境状态健康指数及各有关参数的分级标准

Table 2 Indices of ESHI and grading criterion of correlation parameters in Xixi Wetland Park

ESHI/EHI	健康状态	D(水塘/河流) /m	SD /m	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	Chla /mg·m ⁻³
0 ~ 20	1 疾病	0 ~ 0.03/0.10	1.01 ~ 0.85	12.92 ~ 6.24	1.00 ~ 0.51	12.68 ~ 8.37	40.38 ~ 31.40
20 ~ 40	2 不健康	0.03/0.10 ~ 0.06/0.17	0.85 ~ 0.62	6.24 ~ 3.02	0.51 ~ 0.26	8.37 ~ 7.12	31.40 ~ 22.42
40 ~ 60	3 亚健康	0.06/0.17 ~ 0.10/0.29	0.62 ~ 0.43	3.02 ~ 1.46	0.26 ~ 0.13	7.12 ~ 6.08	22.42 ~ 13.44
60 ~ 80	4 健康	0.10/0.29 ~ 0.16/0.49	0.43 ~ 0.26	1.46 ~ 0.70	0.13 ~ 0.07	6.08 ~ 5.26	13.44 ~ 4.46
80 ~ 100	5 很健康	>0.27/0.83	0.26 ~ 0.20	0.70 ~ 0.34	0.07 ~ 0.03	5.26 ~ 4.56	4.46 ~ 0.05

3.4 西溪湿地公园水环境健康季节性差异

通过对水环境健康模型的计算,得到西溪湿地公园水环境健康状况的季节性差异. 总体而言,西溪湿地公园水环境状态健康处于健康的状态,但是经过水环境过程健康修正之后的水环境综合健康处于亚健康的状态. 西溪湿地公园水环境健康综合评价结果的季节性差异主要体现在冬季的健康指数最低,处于不健康在状态,其他季节都处于亚健康的状态.

表 3 是西溪湿地公园中水塘和河溪水环境健康的季节性差异. 通过 ANOVN 分析表明水塘和河溪

的水环境健康存在差异明显. 西溪湿地公园水塘水环境健康情况优于河溪水环境健康. 具体表现为,水塘水环境状态处于健康状态,而河溪水环境状态处于亚健康的状态;水塘水环境综合评价处于亚健康状态,而河溪水环境综合评价处于不健康的状态. 水环境过程健康评价表明,水塘和河溪水环境弹性差异不明显,水塘水环境稳定性优于河溪水环境的稳定性,而水塘水环境的恢复力低于河溪水环境. 水塘和河溪水环境健康的季节性差异一致,都表现为夏季的水环境健康指数最高,冬季的水环境健康指数最低.

表 3 西溪湿地公园水塘和河溪水环境健康指数季节性差异¹⁾

Table 3 Seasonal variation of water health in ponds and creeks of Xixi Wetland Park

评价指标	水塘					河溪				
	春季	夏季	秋季	冬季	年平均	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
水环境状态健康指数 ESHI	58.34 ^b	74.09 ^a	57.74 ^b	57.07 ^b	61.81 ^a	55.57 ^b	55.77 ^b	59.33 ^b	56.52 ^b	56.80 ^b
EEI	0.10 ^b	0.17 ^a	0.16 ^b	0.13 ^b	0.15 ^a	0.19 ^a	0.23 ^a	0.12 ^b	0.11 ^b	0.20 ^a
水环境过程健康指数 EPHI	ESI	0.36 ^b	0.06 ^b	0.62 ^a	0.04 ^c	0.27 ^b	0.54 ^b	-0.20 ^d	-0.48 ^d	0.76 ^a
ERI	0.02 ^b	0.17 ^a	0.01 ^b	-0.14 ^d	-0.09 ^d	-0.02 ^c	0.34 ^a	-0.07 ^c	-0.11 ^d	0.01 ^b
水环境健康指数 EHI	39.58 ^a	53.43 ^a	39.86 ^a	37.99 ^b	42.72 ^a	37.96 ^b	39.28 ^b	38.01 ^b	36.71 ^b	37.99 ^b

1) 同一行中的 a、b、c、d 表示差异明显

4 讨论

本研究在对水环境状态健康研究时,对比陈文岳等^[19]2006 年对西溪湿地公园的水质监测数据,发现西溪湿地公园在建成后,其水质得到了明显的改善. 本研究在对浮游植物生物量研究时,仅在前人研究的基础上,利用叶绿素 a 进行推算. 同时也没有考虑诸如细菌、浮游动物、水生植物、底栖动物及鱼类等其他水生生物. 建议在以后类似的研究过程中,尽可能全面地监测水环境特征,以求能够全面地反映实际情况.

本研究对水环境过程的评价实际上是对水环境健康评价中修正系数的计算,水环境状态健康经过过程健康的修正之后得到水环境健康的综合评价结果. 在水环境过程健康的评价中,稳定性和恢复力计算模型的设计主要是把水体富营养化的程度作为水环境状态健康的制约因子. 在今后的研究中,应该根据不同水体类型,选择不同的制约因子进行模型设计,从而为湿地水环境的健康发展提供有效支持.

5 结论

(1) 水环境健康评价模型包含水环境状态健康

和过程健康两方面. 其中, 水环境状态健康评价指标包含基础指标、基准指标和扩展指标; 水环境过程健康包含弹性指标、稳定性指标和恢复力指标 3 方面.

(2) 由西溪湿地公园水环境总体特征可见, 水塘的水环境优于河溪的水环境. 水塘水体的 SD 大于其在河溪中的; 水塘中 TN 和 Chla 的含量均低于其在河溪中的含量.

(3) 西溪湿地公园水环境整体处于亚健康的状态. 水环境健康状况季节性变化明显, 冬季的水环境健康指数最低, 夏季水环境健康指数最高. 西溪湿地公园中水塘和河溪的水环境健康情况也各异, 水塘水环境健康情况优于河溪水环境.

参考文献:

- [1] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 等. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康 [J]. 生态学报, 2005, **25**(6): 1481-1490.
- [2] 张晓琴, 石培基. 基于 PSR 模型的兰州城市生态系统健康评价研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24**(3): 77-82.
- [3] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍, 等. 湖泊生态系统健康定量评价方法 [J]. 生态学报, 2005, **25**(6): 1466-1474.
- [4] 高学平, 赵世新, 张晨, 等. 河流系统健康状况评价体系及评价方法 [J]. 水利学报, 2009, **40**(8): 962-968.
- [5] 李玉凤, 刘红玉, 曹晓, 等. 西溪国家湿地公园水质时空分异特征研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2036-2041.
- [6] 付金沐, 刘敏, 史志刚, 等. 涡河干流水污染时空分布特征与水质动态评价 [J]. 水土保持研究, 2007, **14**(4): 82-88.
- [7] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展 [J]. 生态学杂志, 2001, **20**(3): 31-36.
- [8] 冯剑丰, 王洪礼, 朱琳. 生态系统多稳态研究进展 [J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1553-1559.
- [9] Xu F L, Jørgensen S E, Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health [J]. Ecological Modelling, 1999, **116**(1): 77-106.
- [10] 金相灿. 中国湖泊水库环境调查研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 133-135.
- [11] 王骥, 王建. 浮游植物的叶绿素含量、生物量、生产量相互换算中的若干问题 [J]. 武汉植物学研究, 1984, **2**(2): 249-258.
- [12] Calvo S, Barone R, Naselli L, *et al.* Limnological studies on lakes and reservoirs of Sicily [J]. Naturalista Siciliano, 1993, **XVII**(Supplement): 19-257.
- [13] 龙邹霞, 余兴光. 湖泊生态系统弹性系数理论及其应用 [J]. 生态学杂志, 2007, **26**(7): 1119-1124.
- [14] Wang S P, Niu H S, Cui X Y, *et al.* Plant communities: ecosystem stability in Inner Mongolia [J]. Nature, 2005, **435**(7045): E5-E6.
- [15] Guo Q F. Plant communities: ecosystem maturity and performance [J]. Nature, 2005, **435**(7045): E6.
- [16] 汪兴玉, 王俊, 白红英, 等. 基于农户尺度的社会—生态系统对干旱的恢复力研究——以甘肃省榆中县为例 [J]. 水土保持通报, 2008, **28**(1): 14-18.
- [17] 沈琪, 刘珂, 李世玉, 等. 杭州西溪湿地植物组成及其与水位光照的关系 [J]. 植物生态学报, 2008, **32**(1): 114-122.
- [18] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准 [S]. 国家环境保护总局, 2002, 3-4.
- [19] 陈文岳, 郑花兰. 西溪湿地水质污染现状与防治对策 [J]. 杭州农业科技, 2008, (4): 25-26.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人