

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

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

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)

大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)

近3年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)

太原市PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)

青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)

北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)

人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)

春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)

青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)

亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)

长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)

黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)

苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)

滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)

城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)

艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)

工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评估 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)

山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评估 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)

UV协同ClO₂去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)

氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)

负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)

磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)

TiO₂@酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)

MnO₂/CFP复合电极的制备及电吸附Pb²⁺特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)

吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO₂催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)

掺铁TiO₂纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)

天然矿物负载Fe/Co催化H₂O₂氧化降解阳离子红3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)

臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)

碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)

低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)

O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)

改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)

热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)

不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)

地表臭氧浓度升高对旱作农田N₂O排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)

亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)

川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)

黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)

汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)

土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)

有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)

水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)

植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)

垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)

1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)

CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)

锯齿新米虾对Cu²⁺和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)

同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)

热水环境中Na⁺活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)

区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)

《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究

张兆永^{1,2}, 吉力力·阿不都外力^{1*}, 姜逢清¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以艾比湖为研究对象,通过采集表层沉积物样品,测定其中8种重金属(Cu、Pb、Zn、As、Hg、Cr、Ni、Cd)的含量,然后结合多种方法分析了其来源、污染状况及潜在生态风险.结果表明:①从偏度上看艾比湖表层沉积物中8种重金属的大小顺序为:Hg>Cd>Pb>Zn>As>Cu>Cr>Ni.②多元统计分析表明8种重金属元素可以辨识为2个主成分;PC1为人为源因子,包括Cd、Pb、Hg和Zn,主要来源于各种农业污染;PC2为自然源因子,包括Cu、Ni、Cr和As,主要受自然地质背景控制.③地积累指数评价表明8种重金属的污染程度由高到低为:Cd>Hg>Pb>Zn>As>Cu>Ni>Cr,在所有采样点中Pb、Cd和Hg均属于轻度和偏中度污染,Zn、As、Cr、Ni和Cu在大多数样点为无污染水平.④潜在生态风险评估表明,沉积物中重金属的潜在生态风险主要由Cd、Hg和Pb引起,三者贡献分别为42.6%、28.6%和24.0%,Cd是最主要的生态风险因子,其次是Hg、Pb,各采样点中8种重金属的潜在生态风险指数(RI)均小于150,为低的生态风险.研究表明总体看艾比湖表层沉积物中重金属含量较少,生态风险较低,但重金属Cd、Pb的含量较高.

关键词:艾比湖;表层沉积物;重金属;污染评价;潜在生态风险评估

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0490-07 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2015. 02. 016

Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China

ZHANG Zhao-yong^{1,2}, Jilili Abuduwaili^{1*}, JIANG Feng-qing¹

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the surface sediment samples were harvested from Aibi Lake, and total contents of 8 heavy metals (Cu, Pb, Zn, As, Hg, Cr, Ni and Cd) were determined. Then the sources, pollution statue, and potential ecological risk were analyzed by using multiple analysis methods. The results show that: ①The order of the skewness for these 8 heavy metals is: Hg > Cd > Pb > Zn > As > Cu > Cr > Ni. ②Multivariate statistical analysis shows that 8 heavy metals can be classified to 2 principle components, among which PC1 (Cd, Pb, Hg and Zn) is man-made source factor and mainly came from all kinds of waste of agriculture; PC2 (Cu, Ni, Cr and As) is natural source and was mainly controlled by the background of the natural geography of this area. ③Accumulation of index evaluation results show that the order of pollution degree values of 8 heavy metals in surface sediments of Aibi Lake is: Cd > Hg > Pb > Zn > As > Cu > Ni > Cr. In all samples, heavy metals Hg, Cd and Pb all belong to low and partial moderate pollution statue, while Zn, As, Cr, Ni and Cu belong to no pollution statue in majority samples. ④Potential ecological risk assessment results show that the potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake mainly caused by Cd, Hg and Pb, and they accounting for 42.6%, 28.6% and 24.0% of the total amount, respectively, among which Cd is the main ecological risk factor, followed by Hg and Pb. In all samples, the potential ecological risk index values (RI) of 8 heavy metals are all lower than 150, and they are all at low ecological risk levels. However, this research also shows that there have high content of Cd and Pb in the sediment. Therefore, we should make long-term monitoring of the lake environment.

Key words: Aibi Lake; surface sediments; heavy metals; pollution assessment; potential ecological risk evaluation

重金属作为非生物降解型污染物,在自然环境中具有潜在生态风险.经过污水排放、大气沉降及地表径流等各种途径进入河口的重金属,会被吸附到颗粒物中,并随着颗粒物进入沉积物^[1-3].生产、生活中大量污染物进入湖泊水体,经过吸附、絮凝、生物积累等过程,转移到湖泊沉积物,从而对生态环境产生影响^[4-6].沉积物在重金属的迁移转化过程

中具有重要意义,是水环境中重金属的主要富集地,并可以通过生物富集和食物链放大等过程进一步影

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471098, 41471173); 国家自然科学基金委-新疆联合基金项目(U1138301)

作者简介: 张兆永(1985~),男,博士研究生,主要研究方向为干旱区环境演变与生态安全, E-mail: baiyangdian313@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jilili@ms.xjb.ac.cn

响人体健康^[7,8]. 因此,对沉积物中重金属来源、污染状况进行研究,不仅能有效识别重金属的人为污染情况,而且能在一定程度上评估重金属的潜在生态风险^[9~11].

艾比湖是准噶尔盆地西部的最低汇水中心(43°38′~45°52′N; 79°53′~85°02′E),是典型的干旱区尾间湖泊^[12,13]. 近50年来随着流域耕地面积的扩大,农业需水的不断增多,导致艾比湖的入湖水量不断减少,水域面积急剧缩小. 与此同时,流域工、农业生产及城镇污染物的排放导致其主要补给河流——精河和博河受到污染,对艾比湖湖泊水质及沉积物重金属含量产生明显影响,导致流域生态环境恶化^[14,15]. 但是目前关于艾比湖表层沉积物中重金属的来源、污染及生态风险方面的研究还未见相关报道. 基于此,本研究以艾比湖表层沉积物为研究对象,通过测定其中重金属的含量,然后采用多种方法揭示其来源、污染状况和潜在生态风险,以期为艾比湖及干旱区尾间湖泊生态环境保护提供科学依据,同时可以为流域经济发展政策的制定提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖是新疆最大咸水湖,由于地处荒漠带,气候干燥,年均降水仅100~200 mm,潜在蒸发量1500~2000 mm. 湖区景观类型多样,植物区系受中亚和蒙古植物区系的影响,植被过渡性明显,艾比湖流域共有各类植物385种,隶属53科191属^[16]. 艾比湖南北两侧山麓发育砾质、石膏质荒漠土,植被为梭梭荒漠、麻黄荒漠;湖滨盐土上为汁盐柴类荒漠,由盐节木、盐穗木组成,也发育较大面积的柽柳灌丛;河流下游新老河道、河叉处发育胡杨林、芦苇和低地草甸,典型地带性土壤为灰漠土和灰棕漠土. 艾比湖的主要补给河流为博尔塔拉河、精河和奎屯河等7条河流. 建国以来在流域工、农业发展等综合因素驱动下,奎屯河、四棵树河和古尔图河等补给河流河水被拦截,精河和博尔塔拉河的入湖量也急剧减少,目前仅有博尔塔拉河和精河注入,但水湖水量也大为减少,这导致艾比湖水域面积从建国初期1000 km²急剧缩小为目前的550 km²左右,湖水平均深度仅1~2.5 m. 湖泊的干涸导致流域生态环境急剧恶化、地下水位不断下降、土壤含盐量不断上升、原有的植被急剧衰败,并逐渐演变为盐漠景观^[17]. 与此同时,随着流域经济的发展,污染物的排放,尤其是农业生产中面源污染物导致

其主要补给河流博河和精河均受到不同程度的污染,最终导致湖泊生态环境的污染.

1.2 样品采集与分析

在室内分析艾比湖(图1)湖底地形分布的基础上,通过网格法并结合3S技术进行采样点布设. 共设立43个样品采集点,采样间距为1.2 km × 1.2 km,在实地采样过程中结合实际情况进行调整,最终生成采样点位置. 所有沉积物样品均取自干涸湖底0~20 cm处表层,每个样点均采集样品400 g,采样后放入聚乙烯样品袋,在采样同时记录样点的编号,沉积物颜色、取样位置、取样日期以及周围环境等状况以备分析.

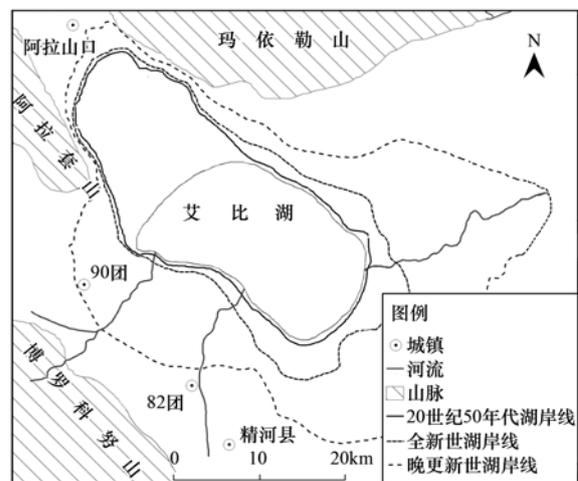


图1 艾比湖位置

Fig. 1 Location of research area

沉积物样品带回实验室,经室温风干后、剔除其中的植物残体和石块、然后磨碎过100目筛,保存于塑料瓶中. 土壤样品中重金属含量的测试在中国科学院新疆生态与地理研究所中心实验室进行. 按照如下步骤进行测定:首先称取0.5 g试样于Anton PVC消解罐,消化后,封严置于消解仪中,升温170℃后维持30 min,待冷却后取出并收集试样、然后过滤定容. 为了避免样品测试中交叉污染,消解罐及所有玻璃器皿在使用之前均使用浓度为5%的硝酸浸泡24 h,冲洗干净后烘干. 上述处理完成后测试沉积物中8种重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)的含量. 其中重金属As和Hg的含量采用原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry, AFS)测定;重金属Cu、Zn、Ni、Pb、Cr和Cd的含量采用等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)测定. 测试仪器的检出限均低于0.01

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),测试的准确度和精密性采用国家土壤标准物质(GBW 系列)进行控制,各重金属的回收率介于 96.5% ~ 101.9% 之间,测试结果符合质量控制要求。

1.3 研究方法

1.3.1 描述性与多元统计分析

采用描述性统计分析重金属的范围、均值、中值、标准差、变异系数、峰度和偏度。采用多元统计方法解析沉积物中重金属的来源,分析过程均在 Spss 19.0 软件中实现。采用的地累积指数法分析沉积物中重金属的污染状况,采用汉克森潜在生态风险法评估重金属的潜在生态危害,相关计算过程

均在 Matlab 7.0 软件中实现。

1.3.2 地累积指数法

地累积指数法是一种研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,该方法能够直观反映外源重金属在沉积物中的富集程度^[18,19]。其公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / 1.5B_i] \quad (1)$$

式中, C_i 为沉积物中重金属的实测值; B_i 为重金属的地球化学背景值;1.5 为考虑到造岩运动可能引起的背景值的变动系数。本研究以新疆土壤重金属的背景值作为参比值,As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的土壤背景值分别为 11.2、0.12、49.3、26.7、0.017、26.6、19.4 和 68.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[20]。

表 1 重金属的污染程度与的 I_{geo} 等级划分

Table 1 The I_{geo} and contamination grades of heavy metals

| 项目 | I_{geo} | | | | | | |
|------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | ≤ 0 | 0 ~ 1 | 1 ~ 2 | 2 ~ 3 | 3 ~ 4 | 4 ~ 5 | > 5 |
| 级数 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 污染程度 | 清洁 | 轻度 | 偏中度 | 中度 | 偏重度 | 重度 | 严重 |

1.3.3 汉克森潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出的一种评价沉积物中重金属生态风险的方法^[21],该方法同时考虑了沉积物中金属含量、污染物的种类、毒性水平和水体对金属污染的敏感性等 4 个影响因素,被国内外学者广泛用于评价沉积物中重金属的潜在生态风险^[22,23]。潜在生态风险指数(RI)的计算方法如下:

$$RI = \sum_i^M E_r^i = \sum_i^M T_r^i \times C_r^i = \sum_i^M T_r^i \times \frac{C_i}{C_n} \quad (2)$$

式中,RI 为沉积物中重金属的潜在生态风险指数; E_r^i 是潜在的生态风险系数; C_r^i 为污染因子; C_i 为沉积物中重金属 i 的实测含量; C_n 为重金属 i 的参比值;为便于比较,本研究以新疆土壤重金属的背景值作为参比值; T_r^i 是单一污染物的毒性系数,可以综合反映重金属的毒性、污染水平和污染的敏感程度。参考文献^[22],重金属 Pb、Ni、Cd、Hg、As、Cu、Zn 和 Cr 的毒性系数分别为 5、5、5、40、10、5、5 和 2。

沉积物中重金属的潜在生态风险评价采用如表 2^[22,23]。

表 2 重金属的生态风险评价和潜在危害程度等级划分

Table 2 Grades of potential ecological risk coefficient (E_r^i) and risk index (RI) of heavy metals

| 单个重金属的潜在生态风险系数(E_r^i)范围 | 风险等级 | 多个重金属的潜在生态风险指数(RI)范围 | 潜在生态危害程度 |
|-----------------------------|------|----------------------|----------|
| $E_r^i < 40$ | 较低 | $RI < 150$ | 较低 |
| $40 \leq E_r^i < 80$ | 中度 | $150 \leq RI < 300$ | 中度 |
| $80 \leq E_r^i < 160$ | 高 | $300 \leq RI < 600$ | 较高 |
| $160 \leq E_r^i < 320$ | 较重 | $RI \geq 600$ | 较重 |
| $E_r^i \geq 320$ | 重 | / | / |

2 结果与分析

2.1 沉积物中重金属的描述性统计特征

描述性统计结果表明(表 3),艾比湖表层沉积物中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均值分别为 15.57、0.17、51.49、39.89、0.033、28.27、39.57 和 114.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;分析表明所测的

8 种重金属元素的平均值均未超过国家土壤质量二级标准的限值($\text{pH} > 7.5$,铜为农田标准)^[24]。但其平均值和最大值均高于新疆土壤背景值^[20];其中重金属 Cd、Hg 和 Cr 的最大值均超过国家土壤质量二级标准。其中艾比湖表层沉积物中重金属 Cd 和 Hg 的平均值分别为 0.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.033 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,为各自背景值的 1.42 倍和 1.94

倍,这说明在流域农业生产及其他人类活动的影响背景下,艾比湖表层沉积物中重金属的聚集趋势较为明显. 根据变异程度的分类^[25],艾比湖表层沉积物中重金属 Cu、Ni、As、Cr 和 Zn (28.65%、24.81%、21.28%、32.42% 和

31.79%)均为中等变异($15\% < CV < 36\%$),而 Cd、Hg 和 Pb(101.51%、95.49%和 85.84%)均属于高度变异($CV > 36\%$). 从偏度来看,艾比湖表层沉积物中 8 种重金属元素的大小顺序依次为 Hg > Cd > Pb > Zn > As > Cu > Cr > Ni.

表 3 重金属的描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of heavy metals

| 元素 | 范围 /mg·kg ⁻¹ | 均值 /mg·kg ⁻¹ | 标准差 /% | 变异系数 /% | 超标率 /% | 峰度 | 偏度 | 背景值 /mg·kg ⁻¹ | 国家二级标准 /mg·kg ⁻¹ |
|----|----------------------------|----------------------------|-----------|------------|-----------|------|------|-----------------------------|--------------------------------|
| Zn | 88.27~217.27 | 114.59 | 31.79 | 72.87 | 22.51 | 22.5 | 19.4 | 68.8 | 300 |
| Pb | 16.29~175.81 | 39.57 | 5.18 | 85.84 | 28.28 | 25.4 | 22.4 | 19.4 | 350 |
| Cu | 32.29~95.84 | 39.89 | 3.54 | 28.65 | 15.27 | 19.6 | 15.4 | 26.7 | 100 |
| Hg | 0.01~1.94 | 0.033 | 2.27 | 95.49 | 24.41 | 43.8 | 37.3 | 0.017 | 1.0 |
| Ni | 11.81~58.18 | 28.27 | 4.28 | 24.81 | 18.27 | 22.2 | 14.6 | 26.6 | 60 |
| As | 6.84~18.58 | 15.57 | 1.89 | 21.28 | 27.18 | 13.7 | 17.1 | 11.2 | 25 |
| Cd | 0.01~0.72 | 0.17 | 0.46 | 101.51 | 15.64 | 33.4 | 29.6 | 0.12 | 0.6 |
| Cr | 45.41~262.81 | 51.49 | 2.95 | 32.42 | 14.19 | 20.2 | 14.7 | 49.3 | 250 |

2.2 沉积物重金属的多元统计分析

2.2.1 相关分析

相关分析表明(表 4),8 种重金属之间的相关关系较复杂,其中重金属 Hg-Zn-Pb 之间的相关性较强. 重金属组合 Pb-Hg、Pb-Zn、Pb-Cd 在 $P < 0.01$ 水平上相关系数分别为 0.698、0.782 和 0.771,为

极显著相关;重金属组合 Zn-Hg、Zn-Cu、Zn-Cd 在 $P < 0.05$ 水平上相关系数为 0.759、0.891、0.598,为显著相关;重金属组合 Ni-As 和 Ni-Cr 在 $P < 0.01$ 水平上相关系数分别为 0.684、0.797;重金属组合 As-Cu 和 As-Cr 在 $P < 0.05$ 水平上相关系数为 0.557、0.619,为极显著正相关.

表 4 重金属的相关关系矩阵

Table 4 Correlation matrix of heavy metals

| | Zn | Pb | Cu | Hg | Ni | As | Cd | Cr |
|----|----------|----------|---------|--------|----------|---------|-------|-------|
| Zn | 1.000 | | | | | | | |
| Pb | 0.782 ** | 1.000 | | | | | | |
| Cu | 0.891 * | 0.272 | 1.000 | | | | | |
| Hg | 0.759 * | 0.698 ** | -0.272 | 1.000 | | | | |
| Ni | -0.327 | -0.147 | 0.354 | -0.213 | 1.000 | | | |
| As | -0.411 | -0.242 | 0.557 * | -0.145 | 0.684 ** | 1.000 | | |
| Cd | 0.598 * | 0.771 ** | -0.541 | -0.414 | -0.144 | -0.114 | 1.000 | |
| Cr | -0.122 | -0.348 | 0.124 | 0.213 | 0.797 ** | 0.619 * | 0.217 | 1.000 |

1) * 为 $P < 0.05$ 显著; ** 为 $P < 0.01$ 显著

2.2.2 主成分和聚类分析

主成分分析是判别环境中重金属来源的有效方法^[4,8,11]. 主成分分析结果表明(表 5),8 种重金属元素可以辨识为 2 个主成分,分别解释总因子的 57.65% 和 29.38%,累计贡献率达到 87.04%,可以解释 8 种元素来源的绝大部分信息. 在第 1 主成分上 Cd、Pb、Hg 和 Zn 具有较大载荷,这些元素的平均值均高于新疆土壤背景值同时元素之间的相关性也较强,结合采样点位置分析,4 种重金属含量较高的样点主要分布于湖南部靠近城镇、农田的沉积中. 结合相关文献分析^[4,10,11,15,25-27] 其应来源于城

镇生活以及农业生产中化肥、农药的不合理使用,造成的重金属污染物排放进入湖泊并在沉积物中沉淀,该主成分主要受人为污染的控制;在第 2 主成分上 Cu、Ni、Cr 和 As 具有较高的载荷,4 种元素含量较高的样点主要分布于艾比湖的北部区域,该区域农业生产活动少,引水灌溉及城镇生活污染物的排放均较少. 结合相关文献分析^[9,11,18,26,28] 沉积物中较高的重金属含量应主要来源于自然地质背景中较高的重金属含量,该主成分应主要受自然地质因素的控制. 于此同时,As 在第 1 和第 2 主成分上均具有相当的载荷,应受人为污染和自然地质因素的

表 5 重金属的主成分因子载荷
Table 5 Factors matrix of heavy metals

| 元素 | 主成分因子 | |
|---------|-------|-------|
| | 1 | 2 |
| As | 0.518 | 0.772 |
| Cd | 0.838 | 0.042 |
| Cr | 0.165 | 0.824 |
| Cu | 0.267 | 0.697 |
| Hg | 0.756 | 0.087 |
| Ni | 0.215 | 0.757 |
| Pb | 0.758 | 0.365 |
| Zn | 0.695 | 0.235 |
| 贡献率/% | 57.65 | 29.38 |
| 累积贡献率/% | 47.45 | 87.04 |

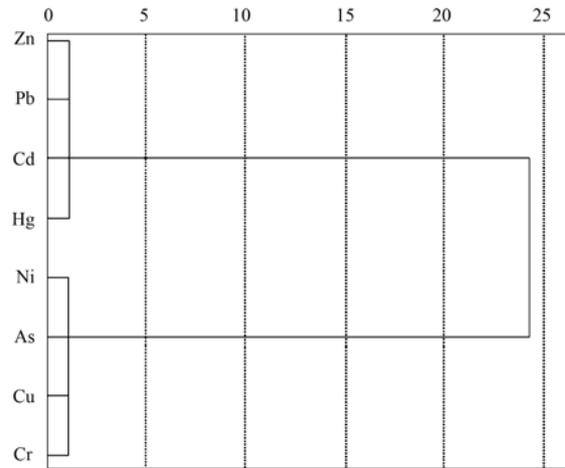


图 2 重金属聚类分析结果

Fig. 2 Clustering tree of heavy metals

共同控制。

聚类分析结果(图 2)和主成分分析结果相对应,进一步验证主成分分析的结果:第一类(Cd、Pb、Hg、Zn)主要来源于人为源;第二类(Cu、Ni、Cr、As)主要来源于自然地质背景。

2.3 重金属污染评价

地累积评价表明^[18,19,23,30][公式(1)、表(6)]. 在所有采样点中,重金属 Cd、Hg 和 Pb 的 I_{geo} 值均大于 0,为轻度和偏中度污染;重金属 Cd、Hg、Pb 的 I_{geo} 值均介于 0~3 之间,其中 Cd 有 72.1% 的采样点为轻度污染,16.7% 的采样点为偏中度污染,11.2% 采样点为中度污染,污染程度最高;Hg 有 76.1% 的采样点为轻度污染,15.6% 的采样点为偏中度污染,8.3% 的采样点为中度污染;Pb 有 77.4% 的采样点为轻度污染,18.2% 的采样点为偏中度污染,4.4%

的采样点为中度污染;在所有采样点中重金属 Zn、As、Cr、Ni 和 Cu 的 I_{geo} 值均小于 1,均属于无污染和轻度污染水平. 从各种污染水平所占的百分比来看,在所有采样点中重金属 Zn、As、Cr、Ni 和 Cu 的无污染程度所占比例最高,均大于 60%;其中在所有污染组成中重金属 Zn、As、Cr、Ni 和 Cu 的轻度污染程度所占的比例分别为 37.5%、11.4%、14.7%、11.8% 和 18.3%. 从 8 种重金属的平均污染程度来看,在 43 个采样点中所测重金属的平均污染级别由高到低依次为: Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > Cr > Ni > As. 其中重金属 Cd、Hg 和 Pb 的 I_{geo} 值分别有 27.9%、23.9% 和 22.6% 的样点均大于 1,其余元素的 I_{geo} 值均小于 1.

表 6 艾比湖表层沉积物重金属地累积指数污染评价结果

Table 6 Pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake

| 地累积指数 | 污染等级 | 污染程度 | 所占比例/% | | | | | | | |
|----------------------|------|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | Cd | Hg | Pb | Zn | As | Cr | Ni | Cu |
| $I_{geo} \leq 0$ | 0 | 无污染 | — | — | — | 60.3 | 88.6 | 85.3 | 88.2 | 81.7 |
| $0 < I_{geo} \leq 1$ | 1 | 轻度污染 | 72.1 | 76.1 | 77.4 | 37.5 | 11.4 | 14.7 | 11.8 | 18.3 |
| $1 < I_{geo} \leq 2$ | 2 | 偏中度污染 | 16.7 | 15.6 | 18.2 | — | — | — | — | — |
| $2 < I_{geo} \leq 3$ | 3 | 中度污染 | 11.2 | 8.3 | 4.4 | — | — | — | — | — |
| $3 < I_{geo} \leq 4$ | 4 | 偏重污染 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| $4 < I_{geo} \leq 5$ | 5 | 重污染 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| $I_{geo} > 5$ | 6 | 严重污染 | — | — | — | — | — | — | — | — |

2.4 潜在生态风险指数法

潜在生态风险系数和生态危害指数计算^[28,29,31]表明 [公式(2)、表 7、图 3],艾比湖表层沉积物中重金属的潜在生态风险主要由 Cd、Hg 和 Pb 引起,三者的生态风险系数对总的潜在风险指数的贡献率分别为 42.6%、28.6% 和 24.0%,而其余 5 种重金属对艾比湖表层沉积物中重金属的潜在生态风险指

数的贡献率仅为 4.8%. 从数值计算角度看艾比湖表层沉积物中 8 种重金属的潜在生态风险的贡献率大小依次为 Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > As > Ni > Cr.

潜在生态风险系数 E_i^i 值计算表明,在所有样点中艾比湖表层沉积物中重金属 Cu、Ni、Cr、Zn 和 As 的 E_i^i 值均小于 40,均属于较低的生态风险;其

中 Cd 的潜在生态风险 E_r^i 平均值为 78, 有 45.7% 的采样点有中度的生态风险; Hg 的潜在生态风险 E_r^i 的平均值为 57, 有 36.4% 的采样点有中度的生态风险; Pb 的 E_r^i 的平均值为 66, 有 32.6% 的采样点有中度的生态风险. 其他重金属的潜在生态风险均较小. 这也与罗燕等^[32] 对大伙房水库沉积物, 王书航等^[33] 对蠡湖沉积物, 袁浩等^[34] 对黄河水系沉积物的研究结果类似, 表明沉积物中较高的 Cd、Pb 和 Hg 的含量与较高的污染指数和潜在生态风险指数均与流域工、农业生产中人为污染物的排放密切相关.

从总的生态危害程度来看, 艾比湖表层沉积物中 8 种重金属的 RI 平均值为 138, 在所有样点中低于此值所占的比例为 98.6%, 均属于较低的生态风险范畴. 总体来看, 艾比湖表层沉积物中重金属含量较低, 其污染及生态风险状况均轻微. 但研究表明近年来绿洲经济发展已经对环境中重金属含量造成负面影响, 导致该流域河流及湖泊水体重金属含量增高和受到污染^[10,14,15], 这又最终导致重金属元素在表层沉积物的积累, 尤其是 Cd、Pb、Hg. 从生态环境保护 and 可持续发展角度, 应对艾比湖流域含重金属的人为污染排放引起足够的重视. 具体来

表 7 艾比湖表层沉积物中重金属潜在生态风险评价结果

Table 7 Potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake

| 参数 | 重金属 | | | | | | | | 潜在生态风险指数 (RI) | 风险分级 |
|----------------------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|---------------|------|
| | Pb | Ni | Cd | Hg | As | Cu | Zn | Cr | | |
| 潜在生态风险系数 (E_r^i) | 66 | 35 | 78 | 57 | 31 | 28 | 24 | 19 | 138 | 低 |
| 所占比例/% | 32.6 | 100 | 45.7 | 36.4 | 100 | 100 | 100 | 100 | 98.6 | |

3 结论

(1) 描述性统计分析表明, 艾比湖表层沉积物中 8 种重金属的含量均未超过国家二级标准值, 但其平均值和最大值均高于新疆土壤背景值. 从偏度上看 8 种重金属大小顺序依次为: Hg > Cd > Ni > Cr > Pb > Cu > Zn > As.

(2) 多元统计分析表明, 影响艾比湖表层沉积物中 8 种重金属含量因素主要有两类: PC1 (Cd、Pb、Hg 和 Zn) 主要受人为污染的控制; PC2 (Cu、Ni、Cr 和 As) 主要受自然地质背景的影响; As 同时受两种因素的共同控制; 相关分析、主成分分析和聚类分析具有较好的一致性.

(3) 地积累指数评价表明艾比湖表层沉积物中重金属 Cd、Hg 和 Pb 为轻度和偏中度污染; Zn、As、Cr、Ni 和 Cu 大多为无污染, 轻度污染也占有一

定比例. 8 种重金属的污染程度大小顺序依次为: Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > Cr > Ni > As; Cd、Hg 和 Pb 分别有 27.9%、23.9% 和 22.6% 样点的 I_{geo} 值大于 1, 其余 5 种重金属的 I_{geo} 值均小于 1.

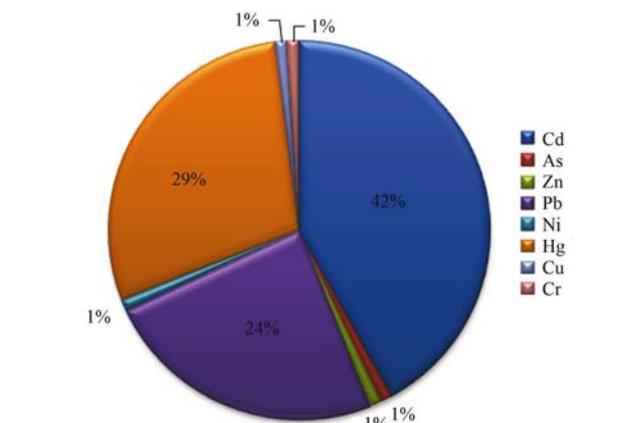


图 3 艾比湖表层沉积物中不同重金属对潜在生态风险指数的贡献

Fig. 3 Contribution ratios of different heavy metals to potential ecological risk indices in surface sediments of Aibi Lake

(4) 潜在生态风险评估表明, 艾比湖表层沉积物中 8 种重金属的潜在生态风险系数大小为: Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > As > Ni > Cr; Cd、Hg 和 Pb 为主要的潜在生态风险因子, 贡献率分别为 42.6%、28.6% 和 24.0%, Cd 是最主要的生态风险因子, 其次是 Hg、Pb; 所有采样点中所测 8 种重金属含量属于较低的生态风险.

参考文献:

- [1] Jacoby J M, Lynch D D, Welch E B, et al. Internal phosphorus loading in a shallow eutrophic lake[J]. Water Research, 1982, 16(6): 911-919.
- [2] Dauvalter V, Rognerud S. Heavy metal pollution in sediments of the Pasvik River drainage [J]. Chemosphere, 2001, 42(1): 9-

- 18.
- [3] Li X D, Poon C, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [4] Salehi A, Mirghaffari N, Koohnejad H, *et al.* Evaluating the role of industrial sludge as a source of heavy metal pollution [J]. *KAUMS Journal (FEYZ)*, 2013, **16**(7): 719-720.
- [5] Ezeilo F E, Agunwamba J C. Analysis of heavy metal pollution status of Amadi creek, port Harcourt, Nigeria [J]. *Health, Safety and Environment*, 2014, **2**(3): 88-96.
- [6] Ren W X, Xue B, Geng Y, *et al.* Inventorying heavy metal pollution in redeveloped brownfield and its policy contribution: case study from Tiexi district, Shenyang, China [J]. *Land Use Policy*, 2014, **38**: 138-146.
- [7] Chen J H, He F, Zhang X H, *et al.* Heavy metal pollution decreases microbial abundance, diversity and activity within particle-size fractions of a paddy soil [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, **87**(1): 164-181.
- [8] Zhang Z Y, Abuduwaili J, Jiang F Q. Determination of occurrence characteristics of heavy metals in soil and water environments in Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Analytical Letters*, 2013, **46**(13): 2122-2131.
- [9] 赵淑苹, 陈立新. 大庆地区不同土地利用类型土壤重金属分析及生态危害评价[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(5): 195-199.
- [10] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清, 等. 天山地表水重金属的赋存特征和来源分析[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(10): 1799-1806.
- [11] 李梅英, 徐俊荣, 刘志兴, 等. 新疆巩乃斯河水中微量重金属元素的特征分析[J]. *水资源保护*, 2009, **25**(5): 44-48.
- [12] Liu D W, Abuduwaili J, Lei J Q, *et al.* Wind erosion of saline playa sediments and its ecological effects in Ebinur Lake, Xinjiang, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **63**(2): 241-250.
- [13] 吉力力·阿不都外力, 徐俊荣, 穆桂金, 等. 艾比湖盐尘对周边地区土壤盐分及景观变化的影响[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(6): 928-939.
- [14] 弥艳, 常顺利, 师庆东, 等. 艾比湖流域2008年丰水期水环境质量现状评价[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(6): 891-894.
- [15] 弥艳, 常顺利, 师庆东, 等. 农业面源污染对丰水期艾比湖流域水环境的影响 [J]. *干旱区研究*, 2010, **27**(2): 278-283.
- [16] 杨晓东, 吕光辉, 田幼华, 等. 新疆艾比湖湿地自然保护区植物的生态分组[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(12): 2489-2494.
- [17] 袁月, 傅德平, 吕光辉. 新疆艾比湖湿地植被优势种间关系研究[J]. *湿地科学*, 2008, **6**(4): 486-491.
- [18] 刘强, 梁雷, 王峰源, 等. 辽河干流消落区沉积物重金属污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2220-2227.
- [19] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 108-115.
- [20] 中国国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [22] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [23] 李珊珊, 单保庆, 张洪. 滏阳河河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(8): 2277-2284.
- [24] GB 15618-1995. 土壤环境质量标准[S].
- [25] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. *地理学报*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [26] 张鹏岩, 秦明周, 陈龙, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3654-3662.
- [27] Thevenon F, Graham N D, Chiaradia M, *et al.* Local to regional scale industrial heavy metal pollution recorded in sediments of large freshwater lakes in central Europe (lakes Geneva and Lucerne) over the last centuries [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **412-413**: 239-247.
- [28] 刘成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 1031-1037.
- [29] 柏建坤, 李潮流, 康世昌, 等. 雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3346-3351.
- [30] 叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 等. 扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1333-1339.
- [31] 贾英, 方明, 吴友军, 等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(1): 147-153.
- [32] 罗燕, 秦延文, 张雷, 等. 大伙房水库表层沉积物重金属污染分析与评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(5): 987-995.
- [33] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
- [34] 袁浩, 王雨春, 顾尚义, 等. 黄河水系沉积物重金属赋存形态及污染特征 [J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(11): 1966-1971.

CONTENTS

| | |
|--|--|
| Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days | ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373) |
| Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station | PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379) |
| Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan | GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388) |
| Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan | LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396) |
| Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China | LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402) |
| Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing | WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408) |
| Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands | SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415) |
| Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring | LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421) |
| Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China | LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430) |
| Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China | ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438) |
| Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China | JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448) |
| Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary | GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457) |
| Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis | CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464) |
| Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake | MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471) |
| Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch | LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481) |
| Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China | ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490) |
| Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region | ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497) |
| Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China | DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507) |
| Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products | LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516) |
| Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration | KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523) |
| Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution | ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530) |
| Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution | LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537) |
| Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed | WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545) |
| Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode | LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552) |
| Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis | WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559) |
| Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation | XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568) |
| Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co | MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576) |
| Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles | ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584) |
| Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal | HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590) |
| Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition | MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597) |
| Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater | DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604) |
| Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement | ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612) |
| Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant | YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619) |
| Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China | QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625) |
| Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland | WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636) |
| Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest | LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644) |
| Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin | LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652) |
| Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China | ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661) |
| Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake | ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669) |
| Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation | LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678) |
| Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation | ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686) |
| Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice | YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694) |
| Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons | ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700) |
| Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L. | XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706) |
| Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel | LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712) |
| Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos | CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719) |
| Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos | LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727) |
| Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors | TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736) |
| Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening | ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744) |
| Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District | FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751) |

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 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