

淮南矿区刘岗塘沉积物中重金属污染现状评价

刘慧力¹, 崔龙鹏¹, 刘培陶¹, 白建峰², 唐修义¹

(1.安徽理工大学 地球与环境学院,安徽 淮南 232001;2.上海第二工业大学 环境工程系,上海 201209)

摘要:通过对淮南矿区典型采煤沉陷水体(刘岗塘)中沉积物若干重金属元素含量的 ICP-AES 测定,分析了沉积物元素含量特征及变化趋势。对照 Hakanson 提出的工业化以前的重金属元素背景值,探讨了重金属元素的富集程度,运用潜在生态危害指数法评估了沉积物的污染程度。同时,根据周边直接及其他间接污染源特点,分析了其对沉积物重金属富集的影响。

关键词:沉积物;重金属;污染评价;刘岗塘;淮南矿区

中图分类号:X824 文献标识码:A 文章编号:1006-8759(2016)01-0061-04

AN ASSESSMENT OF HEAVY METAL POLLUTION IN LIUGANG POND SEDIMENTS IN HUAINAN MINING AREA

LIU Hui-li¹, CUI Long-peng¹, LIU Pei-tao¹, BAI Jian-feng², TANG Xiu-yi¹

(1.College of Earth and Environment Sciences, Anhui University of Science and Technology, HuaiNan 232001, China; 2.Department of Environmental Engineering, ShangHai Second University of Industry, ShangHai 201209, China)

Abstract: The concentration variation of heavy metals in sediments of a typical coal-mining induced subsidence surface water in Huainan mining area were investigated by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). The concentrations of these elements were compared with their background values proposed by Hakanson before industrialization. The further assessment of heavy metal pollution was conducted on the basis Potential Ecological Risk Index (PERI). Additionally, sediment quality for the metals could be adversely affected by direct and indirect pollution sources surrounding the subsidence water.

Key words: sediment; heavy metals; pollution assessment; Liugang pond; Huainan mining area

沉积物的微量元素初始来源于母岩的风化,人类活动使某些元素累积,引起环境污染^[1]。沉积物中重金属元素的环境化学及污染评价是一项重

要研究内容^[2]。我国对河流水体沉积物的某些重金属元素的分布、形态和迁移规律有较多的研究^[3,4,5],但对于矿区沉陷塘沉积物主要重金属元素的自然继承和人类活动叠加的分析研究较少涉及^[6,7]。

淮南是我国华东最大能源基地,正在加快实施煤电化“三大基地”(2003-2010年)和“生态淮

收稿日期:2015-08-21

基金项目:淮南市人民政府《淮南生态市建设规划》、安徽省“十五”攻关项目(01013020)、安徽省“十一五”攻关(06013065A)项目资助。

第一作者简介:刘慧力(1982-),男,安徽萧县人,硕士研究生,主要从事矿业环境工程方面的研究。

南”(2003–2020年)建设^[8]。根据《淮南市近期建设规划》(2005–2010年),城市重点规划建设两处生态恢复区^[9]:一是城市东部的大九煤矿塌陷生态恢复区;二是城市西部水域生态恢复区(即十涧湖、淮西湖、刘岗塘周边地区)。刘岗塘位于淮南望峰岗至蔡家岗公路以北的采煤沉陷区,是一个井工开采诱发形成的典型沉陷塘。本文以刘岗塘为例,采集水体沉积物样品,采用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)分析技术精确测定主要重金属含量,系统开展重金属元素污染现状评价,研究评估自然过程和人类活动对沉陷塘沉积物重金属元素的累积污染,以期为生态恢复区建设提供科学依据。

1 沉积物样品采集和分析测试

1.1 样品采集

刘岗塘四周分布工厂和矿山,也有农田和养殖场(刘岗塘现在也已被当地居民承包养殖),大塘外围分布有3座堆积量非常大的煤矸石山和一个垃圾填埋场,经雨雪淋溶排放的污水或形成地表径流,或直接流入刘岗塘,引起塘内某些重金属元素的富集,并且相当一部分沉淀在沉积物中(见图1)。本项目研究在刘岗塘的湖岸区布置了8个采样点,使用沉积物采样器采集表层(0~5 cm左右)淤泥,对每个样点分别采集3~5个沉积物样(统计布点),均匀混合后,用塑料袋盛装,封口,以防止污染。每个采样点采集样品约1~2 kg,以满足多项分析测试要求。具体采样点见图1所示。

1.2 样品的分析测试

所有样品均在35℃条件下烘干、研碎。由于重金属在沉积物中富集与粒度有关,在细颗粒中

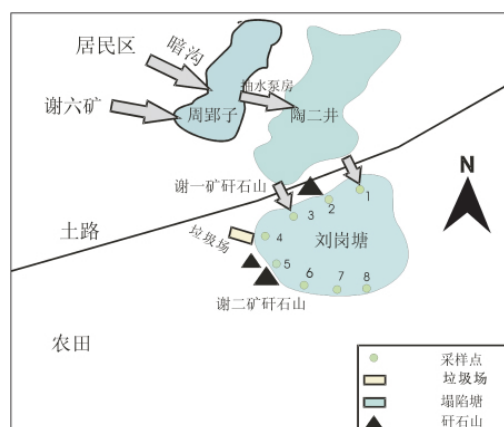


图1 刘岗塘沉积物采样点布置及周边环境示意

相对富集。为使样品的测定具有可比性,选取 $\leq 63 \mu\text{m}$ 粒度样品进行处理与分析测定。沉积物样品采用三酸($\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$)全消化法消解。消化溶液定容后,采用ICP-AES(型号AFS-230)测定Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn元素。样品的分析测定由中国科学院南京土壤研究所完成。

为控制样品的预处理及仪器分析质量,选用了加拿大颁布的沉积物标样(LKSD-1)作为标准参考物,以评价分析过程的精确性(见表1)。

表1 沉积物标样(LKSD-1)测试值与标准值比较(10^{-1})

元素	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
测试值	1.14	10.3	37.0	564	9.96	75.8	290
参考值	1.20	12.0	44.0	700	12.0	84.0	331
回收率%	95	85	84	81	83	90	88

2 数据分析与讨论

调查刘岗塘沉积物中重金属的含量见表2。

2.1 刘岗塘沉积物中重金属的富集状况

重金属的富集程度通常用富集系数的大小来

表2 刘岗塘沉积物中重金属元素的含量(单位mg/kg)

采样标号	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
LG-1	1.85	49.4	30.0	472	31.9	13.4	85.9
LG-2	1.66	49.9	24.5	391	47.5	25.8	88.0
LG-3	2.10	60.8	25.4	596	23.9	14.4	84.0
LG-4	1.43	27.5	23.8	363	32.5	19.4	67.3
LG-5	1.72	52.1	79.4	442	202	34.2	130
LG-6	1.34	38.9	19.4	311	17.0	23.7	57.8
LG-7	1.18	33.9	13.9	269	16.2	9.23	40.9
LG-8	1.53	41.1	14.9	504	17.0	10.1	48.9
平均值	1.60	44.2	28.9	419	48.5	18.8	75.4
标准偏差	0.29	10.8	21.1	107	62.9	8.67	28.3

衡量,富集系数 C_{if} 可表示为

$$C_{if}^i = C_m^i / C_n^i \quad (1)$$

式中: C_m^i 为沉积物重金属浓度的实测值 (见表 2), C_n^i 为计算所需的参比值 (环境背景值)。因参比值的选择差别较大, 本文采用瑞典学者 Hakanson 提出的现代工业化以前正常颗粒沉积物中重金属的最高背景值为参比值^[10]。Cr、Pb、Cd、Cu、Zn 的环境背景值分别为 60 mg/kg、25 mg/kg、0.50 mg/kg、30 mg/kg、80 mg/kg, 没有以当地沉积物的重金属背景值为参比值, 因为前者能更好地反映潜在的生态危害程度^[11]。由于研究重金属的毒性及污染, 所以本文对所测元素 Mn、Ni 不作为评价元素。选择 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 进一步进行潜在生态危害评价。根据 (1) 式可计算各监测点不同重金属的富集系数, 如表 3 所示。

表 3 刘岗塘沉积物中重金属的富集系数

采样编号	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
LG-1	3.70	0.82	1.00	0.54	1.07
LG-2	3.32	0.83	0.82	1.03	1.10
LG-3	4.20	1.01	0.85	0.58	1.05
LG-4	2.86	0.46	0.79	0.78	0.84
LG-5	3.44	0.87	2.65	1.37	1.63
LG-6	2.68	0.65	0.65	0.95	0.72
LG-7	2.36	0.57	0.46	0.37	0.51
LG-8	3.06	0.69	0.50	0.40	0.61
平均值	3.20	0.74	0.97	0.75	0.94

从富集系数来看, 虽然总体上呈现出相似的特点, 但是不难发现 Cd、Cr、Zn 都是①、②、③、⑤ 采样点的含量均超过平均值, 并且比其他几个采样点的含量要高。②、④、⑤、⑥号采样点 Pb 的含量以及①、⑤号采样点 Cu 的含量也超过平均值且高于其他采样点。在下面的重金属污染分布分析中将详细阐述。

2.2 刘岗塘沉积物中的重金属的污染特征

为了研究刘岗塘沉积物中重金属元素的空间分布的差异性并分析造成这种状况的原因, 我们把不同采样区域的重金属含量做一个对比, 结果如图 2、图 3 所示。

通过对比分析可以知道, 各采样点沉积物中 Cd、Cr 的含量都很均衡一致, 只有③号采样点较其他采样点偏高一些。而 Pb、Cu、Zn 在⑤号采样点表现明显富集。野外污染源调查揭示, ③号采样

点异常主要源于谢一矸石山的堆置; ⑤号采样点异常主要源于谢二矸石山的堆置和近旁垃圾场的影响。

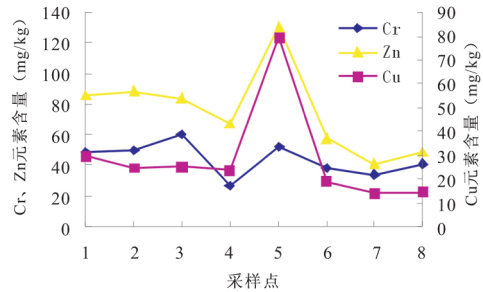


图 2 不同采样点沉积物中 Cr、Cu、Zn 的含量对比

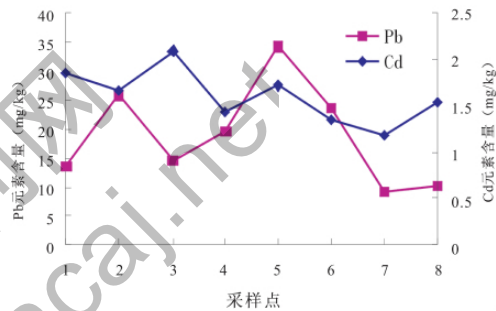


图 3 不同采样点沉积物中的 Cd、Pb 的含量对比

垃圾场采用的是自然沟壑填埋的简单方法处理。垃圾中富含重金属元素, 尤其是 Pb 的含量为高, 以 Pb 为主的重金属有毒元素也会通过雨水、雪水等载体渗透到刘岗塘水体中, 并在水体中积聚下来, 在沉积物中显示其富集特征。

矸石山经风蚀后的扬尘悬浮于大气中, 并随风降落于周边的土壤中或是矸石山受大气降水的冲刷和淋溶作用而使重金属随地表径流进入土壤中^[12], 而进入土壤的重金属很难分解, 并且很快地积聚下来, 经雨水、雪水再流入刘岗塘中经沉积作用在沉积物中富集成污染状态。另外, 崔龙鹏^[13]在研究采矿活动对煤矿区土壤的重金属污染中阐述: 淮南属于淮河流域, 土壤的 pH 值在 7.2~8.5 之间, 一般呈中性或是偏碱性, 所以其 pH 值偏高。土壤 pH 值及有机质含量对重金属在土壤中的形态和迁移转化影响显著。土壤对铅的固定作用与土壤阳离子交换呈正相关, 而与土壤呈负相关^[14]。淮南的土壤偏碱性, 而且土壤中的无机物比有机质要多, 因此重金属 Pb 不易被植物吸收, 而是随雨水或雪水渗透到刘岗塘的水体中。由以上分析可知⑤号采样点 Pb 的富集含量高于其他各采样点。

刘岗塘附近有三个矸石山：谢一矸石山（一座）、谢二矸石山（两座），⑤号采样点在两座谢二矸石山旁。因为谢二矿的矸石堆置总量大于谢一矿，Pb、Cu 在煤矸石中的浓度较高^[15]，所以在淋溶过程中析出量较多；煤矸石在淋溶过程的析出量不仅和周围土壤的 pH 值有关，而且还与时间的增长有关，析出量随时间的增长呈明显增大趋势。淋溶时间的影响有三种基本类型：抛物线型、逐渐降低型和逐渐上升型。而 Zn 属于逐渐上升型^[15]。这就说明随时间的增长，Zn 的富集浓度会逐渐增高，综上所述可知⑤号采样点的 Cu、Zn 高于其他各点。

另外，在刘岗塘的北面有一个陶二井养殖塘，刘岗塘和陶二井塘之间虽然有一条土路相隔，但是在土路下面有两个大水泥管，它们实际上把陶二井和刘岗塘的水体连在了一起。在陶二井的西面有一个周郢子大塘，周郢子大塘和陶二井之间有一个排水泵站，这是谢家集六矿为了修建一个运煤公路而把周郢子水抽送到陶二井，使周郢子水位下降以便铺路方便。周郢子塘西面有一些暗沟，里面蓄积了大量的污水，其来源是谢家集居民排放的生活污水和谢家集六矿生产排放的矿井废水。这些污水经周郢子塘流入陶二井塘，由于陶二井的水位比刘岗塘高，所以污水最后稀释流至刘岗塘，而流入刘岗塘是通过这两个水泥管，入口处正是①、③采样点处。

2.3 刘岗塘沉积物重金属的生态危害评价

本文采用瑞典学者 Hakanson 潜在生态危害指数法对刘岗塘沉积物中重金属的生态危害进行了评价。潜在生态危害指数集中反映了表层沉积物重金属的含量、种类、毒性水平及水体对重金属污染的敏感性等：1) 表层沉积物重金属的浓度，即潜在生态危害指数之值应随重金属污染程度的加重而加重；2) 重金属污染的种类数，即受多种重金属污染的沉积物的潜在生态危害指数，应高于只受少数几种重金属污染的沉积物；3) 重金属的毒性水平，即毒性高的重金属对潜在生态危害指数的数值有较大的贡献；4) 生态对重金属污染的敏感性，即对重金属污染敏感性大的生态应有较高的潜在生态危害指数值^[10]。根据这一方法，某一区域沉积物中第 i 种金属的潜在生态危害系数 E_i^i 以及沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数 R_i

可分别表示为

$$E_i^i = T_i^i \times C_i^i \quad (2)$$

$$R_i = \sum_{i=1}^n E_i^i \quad (3)$$

式中： C_i^i 为重金属的富集系数， T_i^i 为重金属 i 的毒性响应系数，反映了其毒性水平和生物对其污染的敏感程度。常见的几种重金属 Cr、Pb、Cd、Cu、Zn 的毒性响应系数分别为：2、5、30、5、1。把上述(1)、(2)、(3)式全部归纳起来可表示为

$$R_i = \sum_{i=1}^n T_i^i (C_m^i / C_n^i) \quad (4)$$

表 4 给出了有关重金属生态危害程度的划分标准^[2]。

表 4 沉积物中重金属生态危害程度划分标准

生态危害系数或指数	生态危害程度
$E_i^i < 40$ 或 $R_i < 150$	轻微
$40 \leq E_i^i < 80$ 或 $150 \leq R_i < 300$	中等
$80 \leq E_i^i < 160$ 或 $300 \leq R_i < 600$	强
$160 \leq E_i^i < 320$ 或 $R_i > 600$	极强

根据(4)式，以现代工业化以前沉积物中重金属最高背景值为参照的计算结果如表 5 所示。

表 5 刘岗塘沉积物中重金属的潜在生态危害系数和危害指数

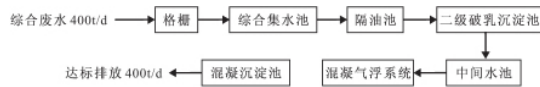
采样点	E_i^i					R_i
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	
LG-1	111	1.64	5.00	2.70	1.07	121
LG-2	99.6	1.66	4.10	5.15	1.10	112
LG-3	126	2.02	4.25	2.90	1.05	136
LG-4	85.8	0.92	3.95	3.90	0.84	95.4
LG-5	103	1.74	13.3	6.85	1.63	127
LG-6	80.4	1.30	3.25	4.75	0.72	90.4
LG-7	70.8	1.14	2.30	1.85	0.51	76.6
LG-8	91.8	1.38	2.50	2.00	0.61	98.3
均值	96.1	1.48	4.83	3.76	0.94	107

从单个重金属的潜在生态危害系数来评价，Cr、Cu、Pb、Zn 的 E_{ir} 值均小于 40，属于轻微生态危害程度。但 Cd 除了⑦号采样点的 E_i^i 值为 70.8 (<80) 为中等污染程度外，其余各采样点的 E_{ir} 值均介于 80~160 之间，属于强污染程度。平均污染程度顺序为 Cd>Cu>Pb>Cr>Zn，以多个重金属的潜在生态危害指数来评价，其指数值变化范围为

(下转第 50 页)

3 调试与工艺改进

工程实际调试过程中发现，厂区实际产生的含油废水中含有大量的乳化液，而乳化液废水中也含有一定量的浮油；从而导致含油废水也需要破乳，而乳化液废水也需要进行隔油处理。因此，为保证出水达标，同时兼顾经济效益，对工艺流程做了调整，调整后污水处理工艺流程如下。



污水站工艺经调整后能够保证所有污水的浮油处理效果和足够的破乳反应时间，从而保证处理效率。

4 处理效果

经当地环保部门检测，污水经过处理后，外排水质如表 3 所示，由表 3 可知，污水站外排水水质达到《污水综合排放标准》GB8978-1996 一级排放

标准。基本消除了污染。

表 3

指标	COD _{Cr} (mg/L)	pH	石油类 (mg/L)	悬浮物 (mg/L)	色度
数值	73	6.7	0.37	41	10 倍

5 结语

本案污水采用隔油-二级破乳-混凝气浮-混凝沉淀组合工艺，出水能够达到国家综合污水排放标准，也可回用作清洗水；投资少，运行费用省，操作简单灵活，具有较好的环境社会效益。

参考文献

[1] 陈依兰. 转动式电凝聚破乳技术在金属加工乳化液处理中的应用, 2004, 56(4), 136~138
 [2] 吴华斌. 涂装循环水、机加工乳化液处理站的运行技术, 2002, 05, 39~42
 [3] 隋博远. 机械加工废乳化液处理工艺的研究, 2007, 27(3) 190~194
 [4] 卞华松. PNN 破乳剂的合成及其乳化液废水处理, 2000, 22(1), 15~17

(上接第 64 页)

76.6~136，均小于 150，8 个采样点的平均 R_i 等于 107，说明刘岗塘沉积物中重金属的生态危害总体轻微。从数据分析可知刘岗塘沉积物重金属的含量分布、富集系数与潜在生态危害系数在不同区域有明显的差异性；源于垃圾场和矸石山的重金属随地表径流的介入，造成⑤号采样点 Pb、Cu、Zn 的富集程度高于其他各点。用于评价的五个有毒重金属中 Cd 在刘岗塘的污染程度最高。重金属在沉积物中大量积累，且迁移能力相对较差，难以降解，虽然总体上处于轻微污染水平，但其对刘岗塘的潜在生态危害性还是应当引起社会的重视。

3 结论

刘岗塘沉积物中各种重金属的含量分布及富集状况均呈现出一定的区域特征。从富集系数来看，Cd 的富集程度最高，Cu、Zn、Pb 的富集程度相对较低，而 Cr 的富集程度最低。

以单个重金属的潜在生态危害系数来评价，Cr、Cu、Pb、Zn 的 E_i^p 均小于 40，属于轻微污染程度。而 Cd 除⑦号采样点的 E_i^p 为 70.8 (<80) 属于中等污染程度外，其余各采样点的 E_i^p 均介于 80~

160 之间，属强污染程度。平均污染程度顺序为 Cd>Cu>Pb>Cr>Zn。各采样点的 R_i 值均小于 150，说明刘岗塘沉积物中重金属的生态危害总体轻微。

刘岗塘沉积物中重金属的含量分布、富集程度和生态危害程度与刘岗塘周围堆积的三座矸石山的风化、淋溶以及矸石扬尘有着密切的关系。刘岗塘近旁还有一个自然填埋的垃圾场，垃圾中富含重金属元素，尤其是 Pb 元素。这些重金属元素随着雨水、雪水迁移到刘岗塘水体中并沉积下来形成富集状态。周郢子塘附近的暗沟是一个十分危险的污染源，会间接给刘岗塘造成重金属污染。可见如何处理好湖区周边的污染源是改善刘岗塘沉积物中重金属污染的关键。

参考文献

[1] 袁旭音, 陈骏, 吕宝源, 等. 太湖沉积物微量元素特征和变化: 自然与人类活动的影响[J]. 地质论评, 2003, 19(5): 552~560.
 [2] 陈静生, 周家义. 中国水环境中金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 1992 168~170.

(下转第 6 页)

- Journal of Geophysical Research,1997,102:16815–16830.
- [39]Kaufman Y J, WALD A E, et al. The MODIS 2.1 μ m Channel correlation with visible reflectance for using in remote sensing of aerosol [J].IEEE Transactions on Geo science and Remote Sensing, 1997,35(5):1286–1298.
- [40]Kaufman Y J,Tanre D. Algorithm for remote sensing of troposphere aerosol from MODIS [J].NASA MODIS Algorithm Theoretical Basis Document. Goddard Space Flight Center,1998,85.
- [41]Kaufman Y J,Tanre D,Remer L.MODIS semi-annual Report[R]2002
- [42]周春艳,仲波.基于 HJ-1A/B 卫星利用结构函数法反演北京地区气溶胶光学厚度[J].第十六届中国环境遥感应用技术论坛论文集.2012.
- [43]Tanre D, Deschamps P Y, DEVAUX C. Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper data[J].Journal of Geophysical Research,1988,93:15955–15964.
- [44]唐家奎,薛勇,虞统等.MODIS 陆地气溶胶遥感反演利用 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 数据协同反演算法[J].中国科学 D 辑, 2005,35(5):474– 481.
- [45]Robert C. Levy ,Lorraine A.Remer. A new algorithm for retrieving aerosol properties overland from MODIS spectral reflectance[J]. submitted by publication,J Geophys Res.,July 2006.
- [46]肖钟湧,江洪等.利用 MODIS 遥感数据反演广州市气溶胶光学厚度[J].中国环境科学 2010,30(5):577–584.
- [47]J.Peijin Veeffkind,Gettit de Leeuw,Phillip A.Durkee. Retrieval of aerosol optical depth over land using two-angle view satellite radiometry during TARFOX[J].Geophysical Research Letters,1998(25): 3135–3138.
- [48]梁顺林.定量遥感[M],北京,科学出版社,2009:154–156.
- [49]Cheng T H,GU Xing fa. High-resolution Directional Polarimetric Camera (DPC) used in the remote sensing of aerosol properties[J].Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2010,111:895.
- [50]F.Waquet,J.Riedi,Lc.Labonnote. Aerosol Remote Sensing over Clouds Using A-Train Observations [J].Journal of the atmospheric sciences,2009(66):2468–2480.
- [51]Winker D M, Vaughan M A,Omar A. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J].Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2009,26(11):2310–2323.
- [52]Omar A H, Winker D M. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm[J].Journal of atmospheric and oceanic technology,2009,26(10):1994–2014.
- [53]Muhammad Bilal, Janet E. Nichol,Max P.Bleiweiss ,David Dubois. A Simplifiedhigh resolution MODIS Aerosol Retrieval Algorithm (SARA)for use over mixed surfaces[J] Remote Sensing of Environment.2013,136:135–145.
- [54]Nicolasi.Sifakis,Christos Iossifidis,Charis Kontoes. CHRISTINE Code for High Resolution Satellite mapping of optical Thickness and τ_{ngstrom} Exponent.PartII:First application to theurban area of Athens,Greece and comparison to results from previous contrast-reduction codes[J].Computers&Geosciences.2014,62:142–149.
- [55]Man Sing Wong, Janet E. Nichol, Kwon Ho Lee. An operational MODIS aerosol retrieval algorithm at high spatial resolution, and its application over a complex urban region [J].Atmospheric Research. 2011,99:579–589.
- [56]Guang Jie, Xue Yong. Comparison Of Two Methods For Aerosol Optical Depth Retrieval Over North Africa From MSG/SEVIRI Data[J]. IEEE,2014,335 –338. [57]D.Carrer,J.L.Roujean,O.Hautecoeur,T.Elias. Daily estimates of aerosol optical thickness over land surface based on a directional and temporal analysis of SEVIRI MSG visible Observations[J].Journal of Geophysical Research,2010,115,D10208:1–24.
- [58]Carrer,D.,X.Ceamanos,B.Six,J.–L.Roujean. AERUS–GEO: A newly available satellite-derived aerosol optical depth product over Europe and Africa, Geophys.Res.Lett.2014.
- [59]王莉莉,辛金元,王跃思.CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性[J].科学通报,2007,52(4):477–486.
- [60]邵培,麻金继.基于偏振数据反演北京地区气溶胶光学厚度及其时空特征的研究[J].大气与环境光学学报,2012,02.
- [61]薛文博,武卫玲等.中国气溶胶光学厚度时空演变特征分析[J].环境与可持续发展,2013,4:17–21.
- [62]何秀,邓兆泽等 MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM10 监测方面的应用研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版) ,2010,46(2): 178–184.
- [63]毛晓琴,陈勇航.应用 CALIPSO 卫星资料研究长三角地区灰霾天气特征[J].2009,第 26 届中国气象学会年会.
- (上接第 50 页)
- [3]陈孝杨,黄河,桑宏庆.应用地积累指数法评价淮河淮南段沉积物中重金属污染[J].安徽科技学院学报,2006,20(2):35–38.
- [4]何华春,丁海燕,张振克,等.淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J].地理科学,25(5):590–596.
- [5]郁亚娟,黄宏,王晓栋,等.淮河沉积物中重金属的测定和污染评价[J].环境科学研究,16(6):26–28.
- [6]杨振,胡明安,黄松.大宝山矿区河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J].桂林学院学报,27(1):44–48.
- [7]周建民,党志,蔡美芳,等.大宝山矿区污染水体中重金属的形态分布及迁移转化[J].环境科学研究,18(3):5–10.
- [8]淮南市人民政府.淮南生态市建设规划(2003–2020)[R].淮南:淮南市人民政府,2005.6
- [9]淮南市人民政府.淮南生态市建设规划(2003–2020)[R].淮南:淮南市人民政府,2006.7
- [10]Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—a sedimentological approach[J].Water Res,1980,14(2):975–1001.
- [11]向勇,缪启龙,丰江帆.太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价[J].南京气象学院学报,2006,29(5):700–705.
- [12]陈峰,胡振琪,柏玉,等.矸石山周围土壤重金属污染的生态风险评价[J].农业环境科学,2006,25(增刊):575–578.
- [13]崔龙鹏,白建峰,史永红.采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究[J].土壤学报,2004,(6):6–14.
- [14]陈怀满.土壤—植物系统中重金属污染[M].北京:科学出版社,1996.
- [15]徐磊,张华,桑树勋.煤矸石中微量元素的地球化学行为[J].煤田地质,2002,30(4):1–3.