DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2013.09.019

基于 AERMOD 模式的固定源对不同楼层大气污染预测研究*

伯　鑫[1,2]　武士蓉[3#]　丁　峰[1,2]　刘　梦[4]

(1.环境保护部环境工程评估中心,北京 100012;
2.国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室,北京 100012;
3.北京师范大学环境学院,北京 100875;4.清华大学环境学院,北京 100084)

摘要　环境影响评价中,大气污染预测通常考虑地面的浓度影响,对高层住宅楼不同楼层影响的考虑较少。通过案例设计,模拟 4 种不同的污染排放情景,采用预测推荐模式 AERMOD 分别计算各情景下 5 个代表高度共 20 种组合情况的预测受体结果,并基于三维可视仪软件 VOXLER 直观显示各情景污染物浓度的空间连续分布情况,对小时最大浓度的分布规律利用分析工具 CANOCO 进行了分析。结果表明:(1)污染源高为 15～80 m 时,不同楼层间小时浓度分布差异性较大;污染源高为 120～240 m 时,楼层间差异性较小。(2)污染源高为 15 m 时,小时最大浓度以 50 m 为分界线随楼层高度的增加先增后降;污染源高为 80～240 m 时,小时最大浓度随楼层高度的增加而增加。

关键词　AERMOD　CANOCO　排放高度　楼层高度　VOXLER

Air pollution prediction of fix pollution source on different floors of building based on AERMOD

BO Xin[1,2], *WU Shirong*[3], *DING Feng*[1,2], *LIU Meng*[4]. (1. *Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing* 100012; 2. *State Environmental Protection Key Laboratory of Numerical Modeling for Environment Impact Assessment, Beijing* 100012; 3. *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing* 100875; 4. *School of Environment, Tsinghua University, Beijing* 100084)

Abstract: Air pollution predictions of environmental impact assessment only consider surface pollutant concentration, but give less concern on the pollutant concentration at different floors of city buildings. In this paper, four pollutant discharge scenarios were simulated in a case design, and AERMOD model was applied to simulate twenty kinds of combination receptors under five representative heights; the spatial continuously distributions of pollutant concentration were visually displayed base on VOXLER, and the law of the maximum hourly concentration distribution was analyzed with help of CANOCO. The results showed that when discharge height was 15-80 m, the distributions of the pollution at different floors presented obvious difference, when discharge height ranged 120-240 m, the difference was insignificant. For 15 m discharge height, the maximum hourly concentration of pollutant increased with the increasing of layer heights, however, the gradual decline was found when the layer heights increased from 50 m to 100 m. For 80-240 m discharges height, the maximum hourly concentration of pollutant was increased with layer heights increased from 0 m to 100 m.

Keywords: AERMOD; CANOCO; discharge height; floors height; VOXLER

由于受传统经济发展体制的约束,我国经济发展方式在不少工业城市仍以高污染、高能耗、粗放经营的模式为主[1]。部分重工业城市市区内存在有电力、冶炼等高污染排放的企业,大量的烟尘、二氧化硫等污染物排入大气,使得城市空气污染问题突出,制约了城市大气环境质量的改善[2]。《环境影响评价法》规定建设有污染的项目必须提交环境影响评价报告书,对其可能产生的环境影响进行识别、预测及评价,并提出合理消减和避免负面影响的措施[3]。实际环境影响评价报告书编制工作中,由于数据获取、评价方法等的局限性,对于大气的污染预测一般仅考虑地面(0 m)的浓度影响,空气质量现状监测采样点和采样高度的设置一般也只针对地面[4-5],很少考虑污染源对城市高层住宅楼的影响。由于近年来房地产开发和城市规划等原因,城市高层住宅楼与大气排污企业的矛盾日益尖锐,为保护高层住宅楼

第一作者:伯　鑫,男,1983 年生,硕士,工程师,研究方向为污染源清单、大气环境质量模拟、大气影响评价技术复核。# 通讯作者。
* 国家环保公益性行业科研专项(No. 201309062)。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

居民高层住宅楼的利益,《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ 2.2—2008)规定,对于临近污染源的高层住宅楼,应适当考虑不同代表高度上的预测受体,比如楼顶层、楼中层、楼底层,以及与主要排气筒高度或有效排放高度相当的楼层等。

大气影响预测及监测工作中一般会得到大量的数据,其普遍特点是数据量较大、种类复杂。如何在大量繁杂无章的数据中发现污染物的分布迁移规律、更好地处理并展示数据结果,是大气评价、分析决策、采取防治措施等相关工作的重要环节。已有的分析绘图软件只能存储二维数据,生成的结果分析图也只限于平面,无法说明不同楼层大气污染预测的分布趋势。

针对上述两大问题,本研究以天津大港为研究区,设计了4种不同的污染排放情景,采用推荐预测模式AERMOD进行模拟,在此基础上进一步分析20个组合情况下代表点位小时最大浓度与排放高度设置及预测受体高度之间的关系。此外,本研究叠加地面高程信息对各排放情景预测范围内污染物空间分布进行了三维建模,以最直观形象的方式展示了不同楼层高度污染物分布,分析污染物的扩散规律,为污染物排放控制及治理提供科学依据及相应建议。

1 研究分析工具简介

1.1 预测模式

AERMOD由美国国家环保署联合美国气象学会组建法规模式改善委员会开发。2007年,国家环境保护总局公布的《环境影响评价技术总则 大气环境(征求意见稿)》(HJ/T 2.2—200*)将该模式列入推荐模式清单[6]。它以扩散统计理论为出发点,假设污染物的浓度分布在一定程度上服从高斯分布。AERMOD可用于多种排放源(包括点源、面源、体源)的排放,适用于多种排放扩散情形的模拟预测[7]。平坦地形时排放源质量浓度($C(x,y,z)$)公式为:

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{\bar{u}}p_y(y,x)p_z(z,x) \qquad (1)$$

式中:Q为污染源排放率,g/s;$\bar{u}$为有效风速,m/s;$p_y(y,x)$、$p_z(z,x)$分别为水平、垂直方向浓度分布的概率密度函数,在稳定边界层(SBL)和对流边界层(CBL)中它们有不同表达方式。在SBL中,浓度分布在垂直、水平方向上都可用高斯分布来表示;在CBL中,水平方向浓度分布可以用高斯分布表示,在垂直方向上的分布则用双高斯概率密度函数(pdf)表示。

1.2 分析工具CANOCO

CANOCO是一款梯度分析软件,即将样方排列在一定的空间,使得排序轴能够反映一定的生态梯度,从而能够解释物种与环境因子间的关系[8-9]。由于其排序分析的直观性,排序分析已被广泛应用于社会经济、气象、气候等其他领域的相关性分析中[10-12]。

本研究将梯度分析方法拓展,用于研究大气污染中小时最大浓度(LD)对污染源高度(PH)以及楼层高度(LH)的响应,将PH、LH视为环境变量,将LD视为物种变量,研究LD与PH、LH之间的关系。

进行排序分析首先将数据转换成软件识别的格式导入;其次,选择合适模型,检测DCA梯度轴的长度,若大于4.0,选择CCA;若为3.0~4.0,选择RDA与CCA皆可;若小于3.0,RDA效果好于CCA[13]。最后利用选择的模型进行排序分析,并作图。

1.3 三维数据可视化软件VOXLER

VOXLER实现了绘制软件在三维空间领域的进一步拓展与应用[14],可根据实测数据真实地展示三维图像,图像能够随着鼠标旋转以任何角度显示[15]。精确的数据分析与形象的图形展示可应用到大气污染的处理和分析中。

VOXLER数据兼容性良好,支持多种散点数据文件,可实现数据的快捷导入。数据按行存储,每一行有4列,分别表示三维坐标点(x,y,z)和对应的属性值c。

2 情景设置

本研究基于AERMOD计算4种代表性的污染源排放情景下污染物小时浓度,其计算所需参数主要包括污染源排放参数、气象参数、预测点位及输出、模式系统基本参数。

2.1 污染源排放参数

设计4种代表性的污染源排放情景,其具体污染源排放参数见表1,因为排放的源强与污染物落地浓度成正比,不考虑扩散过程的衰减时,污染源排放参数只是一个相对量,因此本实验不考虑具体的污染物名称,研究分析计算结果时,只需要关注落地浓度的相对大小。

2.2 气象参数选取

本研究AERMOD采用某城市气象条件进行计算分析。采用国内某平原沿海城市地区2007年全年逐日逐次地面气象观测数据。该地区主导风为东风(E),出现频率9.8%。全年年均风速为2.3 m/s,

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　污染源排放参数
Table 1　Emission factors of pollutant source

案例	源类型	排放源强 /(g·s^{-1})	烟囱高度 /m	烟囱内径 /m	出口烟气温度 /℃	出口烟气速度 /(m·s^{-1})
1	高架源-1	100	240	10.6	120	25
2	高架源-2	100	120	10.4	120	14
3	中架源	100	80	2.2	120	14
4	低架源	100	15	1.6	120	3

静风频率(风速＜0.5 m/s)为 3.5%。预测中所需高空数据采用中尺度数值模式 MM5 模拟生成对应逐日 2 次模拟探空数据。

2.3　预测点位及输出

AERMOD 预测点位为不同高度(0、20、50、80、100 m)网格内的小时最大落地浓度点，预测范围为 40 km×40 km，预测网格采用直角坐标网格，网格距设置为 200 m。

2.4　模式系统基本参数

AERMOD 预测中的有关参数进行保守选取，即不考虑化学转化、扩散过程的衰减、干湿沉降等影响。详细参数见表 2。

表 2　AERMOD 模式计算选用参数一览表
Table 2　Calculation parameters of AERMOD model

时段	地表参数			化学转化
	正午反照率	伯恩率	地表粗糙度	
冬季(12、1、2 月)	0.35	1.5	1	不考虑
春季(3－5 月)	0.14	1.0	1	
夏季(6－8 月)	0.16	2.0	1	
秋季(9－11 月)	0.18	2.0	1	

3　结果与分析

3.1　小时浓度空间分布

利用 VOXLER 对 AERMOD 预测得到的浓度数据进行处理后以体积渲染图展示 4 种设定排放情景下预测范围内大气污染物的三维空间分布特征，烟囱位于 $x=20$ km 与 $y=20$ km 的交界点，沿 X 轴正方向为正东，沿 Y 轴正方向为正北，Z 轴正方向为高度方向，结果如图 1 至图 4 所示。对照图 1 至图 4 可以直观分析污染物空间分布及扩散规律。污染物小时浓度在同一楼层高度上呈现由污染源向四周逐渐扩散衰减的趋势，因此距离污染源越远污染越小。垂直方向上污染源为 15～80 m 时，不同楼层间小时浓度分布差异性较大；污染源为 120～240 m 时，楼层间差异性较小。烟囱高度越小，小时浓度数据越大，大气污染情况越严重。

3.2　小时最大浓度分布

对不同设计方案采用 AERMOD 计算在不同污染源高度设置下城市地区不同楼层高度的小时最大浓度，将组合情况下各代表点位按 1～20 进行编号，结果见表 3。

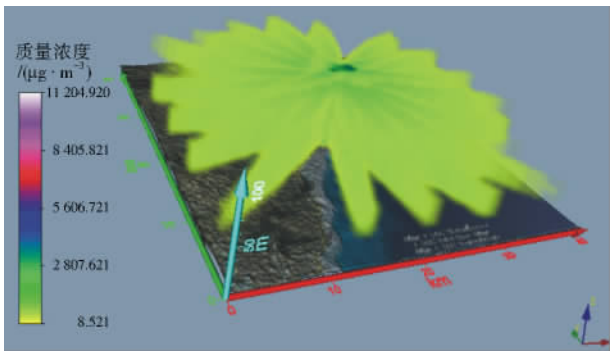


图 1　15 m 烟囱对不同高度上的预测受体结果(小时浓度)
Fig. 1　Effect of 15 meter chimney on air quality of different height floor

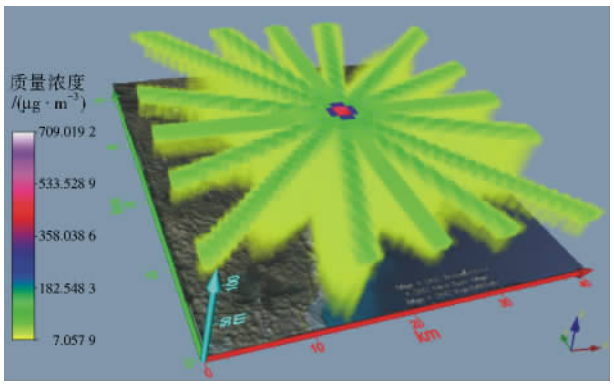


图 2　80 m 烟囱对不同高度上的预测受体结果(小时浓度)
Fig. 2　Effect of 80 meter chimney on air quality of different height floor

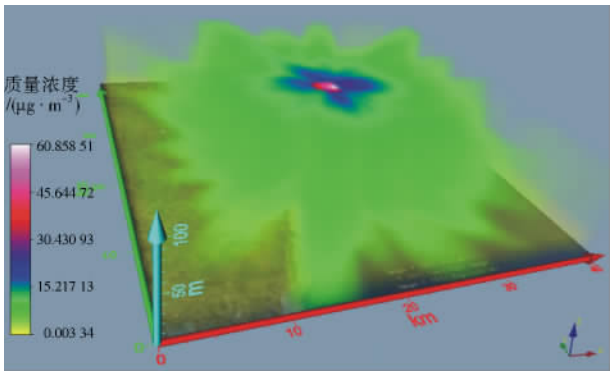


图 3　120 m 烟囱对不同高度上的预测受体结果(小时浓度)
Fig. 3　Effect of 120 meter chimney on air quality of different height floor

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

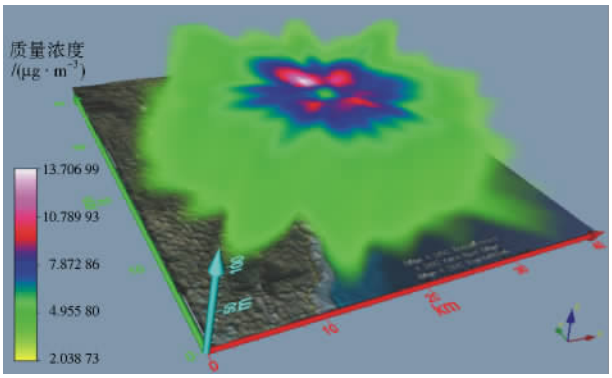


图 4　240 m 烟囱对不同高度上的预测受体结果(小时浓度)
Fig. 4　Effect of 240 meter chimney on air quality of different height floor

表 3　典型城市案例结果
Table 3　Prediction results of typical city

编号	PH/m	LH/m	LD/(μg·m⁻³)
1	15	0	3 600.00
2	15	20	5 489.00
3	15	50	34 446.00
4	15	80	22 828.00
5	15	100	10 408.00
6	80	0	128.00
7	80	20	133.00
8	80	50	260.00
9	80	80	1 647.00
10	80	100	4 205.00
11	120	0	27.33
12	120	20	27.41
13	120	50	27.65
14	120	80	52.45
15	120	100	175.72
16	240	0	13.95
17	240	20	13.98
18	240	50	14.06
19	240	80	14.19
20	240	100	14.31

经初步研究，本研究用到的排序方法为 RDA，相关关系的显著性采用蒙特卡罗拟合进行检验，显著水平确定为 $p<0.05$。并用二维排序图展示 LD、PH、LH 以及采样点位之间的关系。

RDA 结果以二维平面图的形式直观展示了 LD 和 PH、LH 指数以及分析点位之间的对应关系(见图 5)。图 5 中的圆点代表 20 个分析点位，圆点之间的距离标示各点位之间的相似性；虚线箭头线表示响应变量 LD，实线箭头线表示解释变量 PH、LH。由图 5 可知，数据可分为 4 组(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ)。对于 15、80 m 的烟囱，1～5、6～10 点分在 2 个组中，不同楼层高度的小时最大浓度相差较大；对于 120、240 m 的烟囱，11～15、16～20 点在同一个组内，不同楼层高度的小时最大浓度值相差较小。

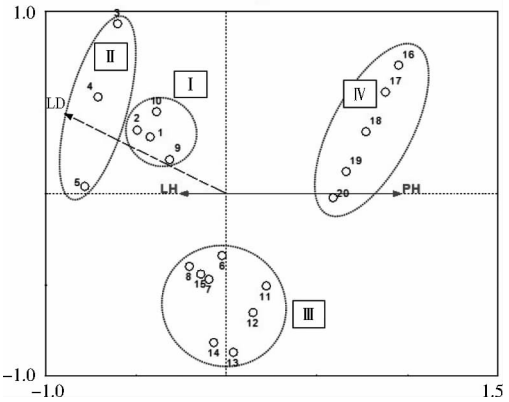


图 5　RDA 二维排序图
Fig. 5　Two dimension sort of RDA

对于 1、2 点来说，楼层高度小于或接近烟囱高度，其小时最大浓度小于 3、4、5 点的对应值，且其值依次为 $LD_3>LD_4>LD_5>LD_2>LD_1$。可知，对于 15 m 的烟囱，小时最大浓度以 50 m 为分界线随楼层高度先增后减。对于 9、10 点来说，楼层高度大于或接近污染源高度，其小时最大浓度远大于 6、7、8 点的对应值，且其值依次为 $LD_{10}>LD_9>LD_8>LD_7>LD_6$。可知，对于 80 m 的烟囱，小时最大浓度随楼层高度的增加而增加。对于 11～15、16～20 点，烟囱高度大于楼层最大高度，总体的小时最大浓度小于 1～10 点；烟囱高度相同时，小时最大浓度随楼层高度的增加而增加。

4　讨　论

4.1　烟囱高度设置

本研究分析可知，高烟囱排放对改善污染物对地面的影响是很明显的。烟囱越高，大气污染物排放影响越小[16]，然而建设过高的烟囱对企业投资是一种负担，因为烟囱的造价大体上与烟囱高度的平方成正比[17-19]，导致其排放削减量与经济投入之间不成正比，而且过高的烟囱还可能对周围环境产生景观上的不协调影响[20]158，因此应该设置合理烟囱高度达到环境效益与经济效益的最大化。本研究中烟囱高度为 120、240 m 时，其污染排放削减效益远大于 15、80 m 的烟囱，并一步分析 120、240 m 烟囱对污染的削减效应，可知烟囱高度增加 1 倍后污染物削减并不显著，因此综合考虑烟囱的造价与污染削减效应时烟囱高度可设置为 120 m，这与兰涛等[20]162的研究结果相似。

4.2　楼层高度设计

本研究表明，污染源(烟囱)高度不同时，相同楼层高度污染物小时浓度不同；污染源高度相同时，不

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同楼层高度污染物小时浓度不同。因此，一方面临近高层住宅区的污染项目设计时，应该考虑对不同楼层的影响，根据预测影响分析采取不同环保措施，防止污染；另一方面，临近污染项目的高层大楼的建设时，应考虑污染对不同楼层的影响，合理规划和设计高层大楼，临近污染源高度较低（15 m）时，应重点关注与污染源高度接近的楼层；污染源高度较高（80～240 m）时，应重点关注高度较大的楼层。

5　结论和建议

（1）污染源高度为 15～80 m 时，不同楼层的小时浓度分布呈较大的差异性；污染源高度为 120～240 m 时，不同楼层高度的浓度分布差异性较小；在同一楼层高度污染物小时浓度呈现由污染源向四周逐渐扩散衰减的趋势。

（2）对于 15 m 的烟囱，小时最大浓度以 50 m 为分界线随楼层高度先增后降；对于 80～240 m 的烟囱，小时最大浓度随楼层高度的增加而增加。

（3）城市地区大气环境影响预测过程中，当项目存在低矮污染源、且敏感点存在居民楼等建筑时，建议增加敏感点不同高度污染物浓度预测，空气质量现状监测也考虑一定高度敏感点的监测，根据居民楼的位置、不同高度楼层的预测结果、监测结果等情况，综合分析项目实施后对大气环境的影响。

参考文献：

[1] 欧阳澍. 基于低碳发展的我国环境制度架构研究[D]. 长沙：中南大学，2011.

[2] 张继娟，魏世强. 我国城市大气污染现状与特点[J]. 四川环境，2006，25(3)：104-109.

[3] 李爱年，胡春冬. 中美战略环境影响评价制度的比较研究[J]. 时代法学，2004(1)：109-120.

[4] 祖歌. 热电厂环境影响评价共性问题研究[D]. 沈阳：东北大学，2008.

[5] 刘晓环. 我国典型地区大气污染特征的数值模拟[D]. 济南：山东大学，2010.

[6] 丁峰，李时蓓，蔡芳. AERMOD 在国内环境影响评价中的实例验证与应用[J]. 环境污染与防治，2007，29(12)：952-956.

[7] 杨多兴，杨木水，赵晓宏，等. AERMOD 模式系统理论[J]. 化学工业与工程，2005，22(2)：130-135.

[8] 苏日古嘎，张金屯，张斌，等. 松山自然保护区森林群落的数量分类和排序[J]. 生态学报，2010，30(10)：2621-2629.

[9] 张璐，苏志尧，陈北光. 山地森林群落物种多样性垂直格局研究进展[J]. 山地学报，2005，23(6)：736-743.

[10] 周庆，张志明，欧晓昆，等. 漫湾水电站库区土地利用变化社会经济因子的多变量分析[J]. 生态学报，2010，30(1)：165-173.

[11] 黄茂怡，黄嘉佑，王勇，等. 近年来 CCA 在气候分析与气候预测中的应用[J]. 北京大学学报：自然科学版，2001，37(1)：128-135.

[12] 赵文慧，宫辉力，赵文吉，等. 北京市可吸入颗粒物的空间分布特征及与气象因子的 CCA 分析[J]. 地理与地理信息科学，2009，25(1)：71-74.

[13] 张志明，王文礼，欧晓昆，等. 梅里雪山植被空间格局与环境因子关系分析[J]. 云南大学学报：自然科学版，2009，31(3)：311-315.

[14] 张景华，邵景力，崔亚莉，等. 三维绘图软件 Voxler 在水质分析数据处理中的应用[J]. 水科学与工程技术，2011(3)：32-34.

[15] 刘慧鹏，李文尧. Voxler 在 EH4 数据资料成图中的应用[J]. 云南地质，2010，29(1)：98-101.

[16] 李达，王春晓. 我国经济增长与大气污染物排放的关系——基于分省面板数据的经验研究[J]. 财经科学，2007(2)：43-50.

[17] PICO Y，FONT G，MOLTO J C，et al. Pesticide residue determination in fruitand vegetables by liquid chromatography-mass spectromety[J]. J. Chromatogr. A，2000，882(1/2)：153-173.

[18] 董旭光，王栋成，张爱英，等. 烟囱高度合理性论证技术方法研究[J]. 环境科学与管理，2006，31(4)：92-94.

[19] 杨佳财，王继民，孙白妮. 电厂烟囱高度确定的技术方法[J]. 环境科学与管理，2007，32(1)：176-180.

[20] 兰涛，张晓瑜，武征，等. 锅炉烟囱高度设置合理性论证的实例分析[J]. 环境科学与管理，2011，36(2).

编辑：黄　苇　（修改稿收到日期：2013-03-18）

（上接第 48 页）

[12] GONG Renmin，SUN Yingzhi，CHEN Jian，et al. Effect of chemical modification on dye adsorption capacity of peanut hull[J]. Dyes and Pigments，2005，67(3)：175-181.

[13] KRISHNANI K K，MENG X，CHRISTODOULATOS C，et al. Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk[J]. Journal of Hazardous Materials，2008，153(3)：1222-1234.

[14] SAIANO F，CIOFALO M，CACCIOLA S O，et al. Metal ion adsorption by *Phomopsis* sp. biomaterial in laboratory experiments and real wastewater treatments[J]. Water Research，2005，39(11)：2273-2280.

[15] AMARASINGHE B M W P K，WILLIAMS R A. Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater[J]. Chemical Engineering Journal，2007，132(1/2/3)：299-309.

[16] LU Lili，CHEN Lihua，SHAO Wenjing，et al. Equilibrium and kinetic modeling of Pb(Ⅱ) biosorption by a chemically modified orange peel containing cyanex 272[J]. Journal of Chemical and Engineering Data，2010，55(10)：4147-4153.

[17] SECO A，MARZAL P，GABALDON C. Adsorption of heavy metals from aqueous solutions onto activated carbon in single Cu and Ni systems and in binary Cu-Ni，Cu-Cd and Cu-Zn systems[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology，1997，68(1)：23-30.

[18] KATSUMATA H，KANECO S，INOMATA K，et al. Removal of heavy metals in rinsing wastewater from plating factory by adsorption with economical viable materials[J]. Journal of Environmental Management，2003，69(2)：187-191.

[19] OZDES D，DURAN C，SENTURK H B. Adsorptive removal of Cd(Ⅱ) and Pb(Ⅱ) ions from aqueous solutions by using Turkish illitic clay[J]. Journal of Environmental Management，2011，92(12)：3082-3090.

[20] OZER A，OZER D. Comparative study of the biosorption of Pb(Ⅱ)，Ni(Ⅱ) and Cr(Ⅵ) ions onto *S. cerevisiae*：determination of biosorption heats[J]. Journal of Hazardous Materials，2003，100(1/2/3)：219-229.

[21] SALTALI K，SARI A，AYDIN M. Removal of ammonium ion from aqueous solution by natural Turkish (Yildizeli) zeolite for environmental quality[J]. Journal of Hazardous Materials，2007，141(1)：258-263.

编辑：贺锋萍　（修改稿收到日期：2013-06-25）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net