

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.04.018

壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻的去除效果

杜胜蓝¹, 刘文杰², 臧常娟³

(1. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省嘉庆水务发展有限公司, 江苏 南京 210002;
3. 江苏大地益源环境修复有限公司, 江苏 南京 210002)

摘要:研究壳聚糖、沸石单独絮凝除藻以及壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻去除效果。结果表明:单独使用壳聚糖,质量浓度在 0.6~1.1 mg/L 时,对铜绿微囊藻的去除率超过 90%;单独使用沸石,沸石质量浓度小于 500 mg/L 时,对铜绿微囊藻的去除率低于 40%。经壳聚糖包覆改性后,壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻絮凝去除能力大幅提高。当壳聚糖质量浓度为 0.5 mg/L,沸石质量浓度为 6~14 mg/L 时,壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻的去除率达 90% 以上。壳聚糖-沸石复合体适用的 pH 值范围在 5~7 之间。

关键词:铜绿微囊藻;叶绿素 a;铜绿微囊藻密度;壳聚糖;沸石;去除率

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2013)04-0087-04

Removal of *Microcystis aeruginosa* by chitosan-zeolite composite

DU Shenglan¹, LIU Wenjie², ZANG Changjuan³

(1. China Machinery International Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, China;
2. Jiangsu Province Jiaqing Water Services Co., Ltd., Nanjing 210002, China;
3. Jiangsu DDBS Environment Remediation Co., Ltd., Nanjing 210002, China)

Abstract: The removal of *Microcystis aeruginosa* by chitosan, zeolite, and chitosan-zeolite composite was studied. The results show that with a dosage of 0.6 to 1.1 mg/L, chitosan can remove more than 90% of *Microcystis aeruginosa*, and with a dosage of less than 500 mg/L, zeolite can remove less than 40% of *Microcystis aeruginosa*. After the modification of zeolite, the chitosan-zeolite composite greatly improved the algal removal efficiency. The chitosan-zeolite composite could remove more than 90% of algae when the dosage of chitosan was 0.5 mg/L and the dosage of zeolite was between 6 mg/L and 14 mg/L. The optimal pH value ranged from 5 to 7 for the chitosan-zeolite composite.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; chlorophyll a; algae density; chitosan; zeolite; removal rate

随着水体富营养化的加剧,蓝藻水华已成为全球性的重大水环境问题^[1]。据报道,世界范围内约有 25%~70% 的蓝藻可产生藻毒素,严重破坏水生生态平衡,危害人类及其他生物的生命安全^[2]。由于蓝藻水华具有潜伏期长、暴发突然等特点^[3],因此有必要研究应急性除藻技术。

藻类去除应急措施包括多种,其中黏土矿物去除藻类是目前较受推崇的方法。黏土矿物来源广泛,价格低廉,且不会产生污染^[4]。但黏土用于除

藻时,使用量较大,由此给大面积治理水华带来了原料量和淤渣量过大的问题,限制了其在水处理中的应用^[5]。为此研究者展开一系列对黏土的改性工作,以增加黏土除藻效率。其中壳聚糖以其独特的优越性,受到广泛关注。壳聚糖是一种天然高分子絮凝剂,具有无毒、无污染、易降解、絮凝效果好等优点^[6]。关于壳聚糖改性黏土用于藻类去除已有很多研究,Zou 等^[7],刘振儒等^[8],石静等^[9]的研究表明,高岭土、海泡石等经壳聚糖改性后,对铜绿微囊

作者简介:杜胜蓝(1987—),女,助理工程师,硕士,主要从事环境工程设计工作。E-mail:dslwh1987@163.com

藻去除率显著提高,且黏土投加量大大减少。但关于沸石对铜绿微囊藻去除的研究报道还较少。大量研究表明,沸石是一类吸附和交换性能较好的黏土矿物,对水体中氮磷营养盐及其他污染物有较好的吸附去除能力^[10-11]。研究沸石对富营养化水体藻类的絮凝去除效果具有一定的现实意义。

笔者研究了壳聚糖包覆改性沸石对铜绿微囊藻的絮凝去除效果,可为壳聚糖改性黏土用于水华处理提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验藻种:铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)购于中国科学院武汉水生生物研究所国家淡水藻种库。藻类培养条件:培养基 M11,光照强度 3 000 lx,光暗比为 12h:12 h,温度为 25℃。

黏土材料:沸石购于浙江原野环境材料技术开发有限公司。所用黏土过 100 目筛分。

1.2 试验分析方法

采用 pH 仪器测量 pH 值,叶绿素 a 测定参见文献[12],测定藻密度采用显微镜计数法。

1.3 试验步骤

①黏土改性:称取 100 mg 壳聚糖,加入 10 mL 质量分数为 1% 的盐酸使之充分溶解,并定容至 100 mL,得到 1 mg/mL 的壳聚糖稀盐酸溶液^[13]。将壳聚糖溶液与黏土混合均匀,即可用于试验。②絮凝除藻试验:取处于指数生长期的铜绿微囊藻,用蒸馏水配制成一定浓度的藻悬液(叶绿素 a 质量浓度 170 ~ 200 μg/L)。在 1L 烧杯中加入 800 mL 藻悬液,再加入所需絮凝剂,用 ZR4-6 混凝试验搅拌机先快速搅拌 3 min (100 r/min),再慢速搅拌 5 min (30 r/min),静置 100 min 后,取上清液进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 壳聚糖单独作用

不同质量浓度壳聚糖对铜绿微囊藻的去除效果见图 1。由图 1 可知,随着壳聚糖用量的增加,叶绿素 a 和铜绿微囊藻去除率整体呈上升趋势。当壳聚糖用量低于 0.4 mg/L 时,去除效果较差,对叶绿素 a 和铜绿微囊藻的去除率均低于 80%。在壳聚糖质量浓度增至 0.6 mg/L 时,叶绿素 a 和铜绿微囊藻去除率达 91% 以上。然而继续增加壳聚糖质量浓度,去除率没有明显增加。

壳聚糖属天然高分子化合物,具有高分子化合物架桥网捕作用。在藻类絮凝中,可通过架桥作用去除藻类。同时壳聚糖分子链上有大量氨基,在稀

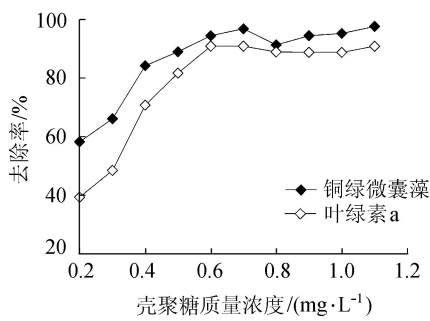


图 1 壳聚糖对铜绿微囊藻与叶绿素 a 去除效果

酸溶液中能结合 1 个氢离子,从而使壳聚糖成为带正电荷的聚电解质^[14],能与表面带负电的藻细胞发生吸附电中和作用。架桥网捕和吸附电中和两者共同作用,使得壳聚糖对铜绿微囊藻有较好的絮凝去除效果。和一般絮凝剂一样,壳聚糖也存在一个最佳质量浓度,如果絮凝剂用量超过最佳质量浓度时,会使所形成的絮体重新变成稳定的胶体,不易沉降^[15]。

2.2 沸石单独作用

由图 2 可知,沸石质量浓度在 100 ~ 500 mg/L 时,对铜绿微囊藻去除率均低于 40%,基本不具备除藻性能。这与潘纲等^[16]的研究结果一致。

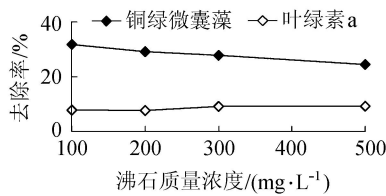


图 2 沸石对铜绿微囊藻与叶绿素 a 去除效果

黏土矿物颗粒具有比表面积大、吸附能力强等特点。有研究认为,黏土矿物对铜绿微囊藻去除主要依靠吸附作用^[17]。但这种吸附作用并不会使藻类稳定去除,低质量浓度的黏土矿物不能起到良好的去除效果。在沸石质量浓度小于 500 mg/L 的条件下,沸石对铜绿微囊藻去除效率均低于 40%。黄斌等^[18]研究表明,沸石质量浓度为 25 g/L 时对铜绿微囊藻去除率可达 93%。由此可知,为达到较高的去除率需投加大量沸石。但由于黏土颗粒自身溶胶性较差,大量投加黏土不仅产生大量淤泥,还会增加水体浊度^[6]。

2.3 壳聚糖-沸石复合体去除效果

研究采用壳聚糖包覆改性沸石,以确定壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻的去除效率。结合壳聚糖单独除藻效果,选取壳聚糖质量浓度为 0.5 mg/L。壳聚糖与不同质量浓度的黏土复合对铜绿微囊藻絮凝去除效果见图 3。

试验发现,加入壳聚糖-沸石复合体的藻悬液在

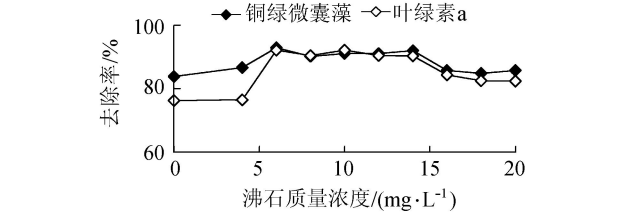


图3 壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻和叶绿素 a 去除效果

搅拌过程中絮体出现较快,而单加壳聚糖的藻液中絮体不明显。随着沸石质量浓度的增加,铜绿微囊藻去除率也增加。沸石质量浓度为 6 ~ 14 mg/L 时,壳聚糖-沸石复合体对叶绿素 a 和铜绿微囊藻的去除效率均在 90% 以上。继续增加沸石质量浓度,铜绿微囊藻去除率反而下降。

由 2.2 节结论可知,黏土质量浓度低于 500 mg/L 时,对铜绿微囊藻去除效率均低于 40%,基本不具除藻性能。但经壳聚糖改性后,对铜绿微囊藻去除率有大幅提高。因为壳聚糖分子链上带有大量游离氨基,在稀酸溶液中被质子化而带正电荷,成为一种典型的阳离子型混凝剂^[14]。沸石由于结构中的类质同象置换、边缘或外表面的破键、伴生羟基组的水解作用而常带有负电荷^[19],难以与带负电的藻细胞结合。经壳聚糖修饰后,沸石的 Zeta 电位增加,颗粒表面也带上正电荷^[20]。在对铜绿微囊藻絮凝过程中既能通过吸附电中和作用使藻细胞脱稳,又能通过壳聚糖高分子化合物的特性对铜绿微囊藻细胞起架桥网捕作用,同时沸石也能起到增重剂的作用,加速藻类沉降速度。

2.4 pH 值对去除效果的影响

当壳聚糖质量浓度为 0.5 mg/L,沸石质量浓度为 10 mg/L 时,在不同 pH 值条件下,壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻的去除效果见图 4。从图 4 可以看出,pH 值小于 7 时,壳聚糖-沸石复合体对叶绿素 a 和铜绿微囊藻的去除率均在 90% 以上。在 pH 值达到 8 时,铜绿微囊藻的去除率降为 87.25%,叶绿素 a 去除率降为 61%。当 pH 值超过 8 时,对铜绿微囊藻去除率显著降低。

壳聚糖属于高分子化合物,自身带有大量氨基,

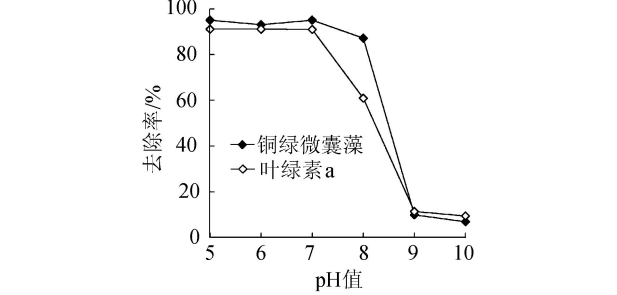


图4 不同 pH 值对铜绿微囊藻和叶绿素 a 去除效果的影响

在酸性溶液中氨基结合 1 个氢离子,从而带大量正电荷^[14]。壳聚糖的这些特点使其被包覆改性后的沸石,既能通过壳聚糖的黏结架桥作用絮凝藻细胞,又能通过黏土表面电荷的改变吸附表面带负电的藻细胞。但在中性或碱性条件下具有非离子性或弱负电性。当水体中 pH 值大于 8 时,壳聚糖分子显弱负电性,不能吸附中和表面带负电荷的藻细胞,从而使絮凝效果大大降低。

2.5 壳聚糖-沸石复合体去除不同密度铜绿微囊藻的效果

壳聚糖-沸石复合体对不同密度铜绿微囊藻的絮凝结果见表 1。从表 1 可看出,在一定范围内,最佳配比条件下的壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻均有较高的去除效率,去除率在 90% 以上。随着藻密度的增加,相应增加壳聚糖与沸石的质量浓度才能取得较高的去除效率。

表 1 壳聚糖-沸石复合体对不同密度铜绿微囊藻去除效果

藻密度/ (10 ⁹ 个 · L ⁻¹)	壳聚糖 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	沸石 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	叶绿素 a 去除率/%	铜绿 微囊藻 去除率/%
1.25	0.50	10.0	92.2	91.1
1.95	0.78	15.6	89.8	94.2
2.85	1.14	22.8	91.6	95.0
4.08	1.63	32.6	91.0	95.2

2.6 絮凝沉淀铜绿微囊藻的显微观察

从图 5 的显微镜像可以看出:①铜绿微囊藻初始状态,在未添加任何絮凝剂时,铜绿微囊藻呈分散状态。②单加壳聚糖在搅拌结束后的状态,尽管已经发生絮凝,但藻间距较大,仅通过壳聚糖高分子的架桥连接作用连接起来;同时,絮体密度与水相接

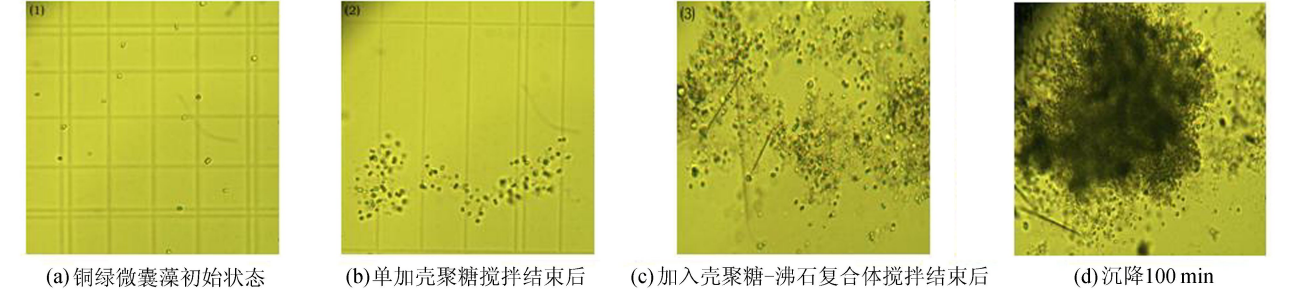


图5 铜绿微囊藻细胞絮凝 100 倍下的显微照片

近,不能形成较为密实的絮体,沉降速度较慢。③加入壳聚糖-沸石复合体搅拌结束后状态,所形成絮体较为密实,且沉降速度快。因为壳聚糖-沸石复合体后,铜绿微囊藻细胞出现凝聚状态,以沸石颗粒为核心而形成的颗粒团,并通过高分子的架桥作用连接起来,形成网状絮体。④搅拌结束后静置沉降 100 min 后状态,在初期形成的网状絮体进一步网捕脱稳的铜绿微囊藻和其他胶体,形成了更为密实的絮体,具有更高的沉降速度。

3 结 论

- a. 单独使用壳聚糖,质量浓度在 0.6 ~ 1.1 mg/L 时,对铜绿微囊藻的去除率均超过 90%,对叶绿素 a 的去除率达 89% 以上。单独使用沸石时,除藻效率较低。在质量浓度小于 500 mg/L 条件下,对铜绿微囊藻和叶绿素 a 的去除率均低于 40%。
- b. 在壳聚糖质量浓度为 0.5 mg/L,沸石质量浓度为 6 ~ 14 mg/L 时,壳聚糖-沸石复合体对叶绿素 a 和铜绿微囊藻的去除率均达 90% 以上。沸石质量浓度超过 14 mg/L 后,随着沸石质量浓度的增加,壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻去除率下降。随着藻密度的增加或减少,相应增加或减少壳聚糖和沸石的质量浓度,均能取得很好的絮凝效果。与单加壳聚糖相比,壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻具有更高的去除性能。
- c. 壳聚糖适用的 pH 值范围在 5 ~ 7 之间,pH 值超过 8 时,壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻去除效率明显下降。

参考文献:

[1] 顾苏莉,陈方,孙将陵. 太湖蓝藻监测及暴发情况分析 [J]. 水资源保护,2011,27(3):28-32. (GU Suli, CHEN Fang, SUN Jianglin. Analysis of cyanobacteria monitoring and algal blooms in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection,2011,27(3):28-32. (in Chinese))

[2] DUY T N, LAM P K S, SHAW G R, et al. Toxicology and risk assessment of freshwater cyanobacterial (blue-green algae) toxins in water [J]. Rev Environ Contam Toxicol, 2000, 163: 113-186.

[3] 田娟,宋碧玉,林桢,等. 两种改性黏土去除群体状铜绿微囊藻的比较 [J]. 湖泊科学,2009,21(5):669-674. (TIAN Juan, SONG Biyu, LIN Shen, et al. Removal of colonial *Microcystis aeruginosa* using two kinds of modified clays [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(5): 669-674. (in Chinese))

[4] HUANG Chihpin, CHEN Shuchuan, RUHSING PAN J. Optimal condition for modification of chitosan: a biopolymer for coagulation of colloidal particles [J].

Water Research, 2000, 34(3): 1057-1062.

[5] 邹华,潘纲,陈灏. 壳聚糖改性黏土对水华优势藻铜绿微囊藻的絮凝去除 [J]. 环境科学,2004,25(6):40-43. (ZOU Hua, PAN Gang, CHEN Hao. Flocculation and removal of water bloom cells *Microcystis aeruginosa* by chitosan-modified clays [J]. Environmental Science, 2004, 25(6): 40-43. (in Chinese))

[6] 刘振儒,赵纪强. 壳聚糖去除铜绿微囊藻的工艺研究及机理探讨 [J]. 青岛科技大学学报,2005,26(5):394-397. (LIU Zhenru, ZHAO Jiqiang. Study on removal of *Microcystis Aeruginosa* by chitosan compounding sepiolite [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2005, 26(5): 394-397. (in Chinese))

[7] ZOU Hua, PAN Gang, CHEN Hao, et al. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils II : Effective removal of *Microcystis aeruginosa* using local soils and sediments modified by chitosan [J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2): 201-205.

[8] 刘振儒,田重威. 壳聚糖复合黏土矿凝聚铜绿微囊藻的研究 [J]. 环境工程,2004,22(3):80-82. (LIU Zhenru, TIAN Chongwei. Study on coagulation removing *Microcystis aeruginosa* in water [J]. Environmental engineering, 2004, 22(3): 80-82. (in Chinese))

[9] 石静,刘春光,王君丽,等. 壳聚糖-高岭土复合体去除铜绿微囊藻的试验研究 [J]. 农业环境科学学报,2009,28(9):1914-1918. (SHI Jing, LIU Chunguang, WANG Junli, et al. Removal of *Microcystis aeruginosa* by chitosan-kaolinite composite [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(9): 1914-1918. (in Chinese))

[10] 董秉直,夏丽华,高乃云. 天然沸石去除腐殖酸和氨氮的研究 [J]. 环境污染与防治,2005,27(2):94-96. (DONG Bingzhi, XIA Lihua, GAO Naiyun. The effect of natural zeolite on removal of humic acid and ammonia nitrogen [J]. Environmental Pollution Control, 2005, 27(2): 94-96. (in Chinese))

[11] 叶志平,于凤娥,何国伟. 天然沸石处理富营养化水的生物基作用研究 [J]. 环境工程学报,2009,3(1):85-88. (YE Zhiping, YU Fenge, HE Guowei. Study on the function of biological carriers of natural zeolite in treating eutrophication water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(1): 85-88. (in Chinese))

[12] 刘春光,孙红文,孙凌,等. 水中浮游藻类叶绿素测定方法:中国, CN1963466 [P]. 2007-05-16.

[13] DIVAKARAN R, SIVASANKARA PILLAI V N. Flocculation of kaolinite suspensions in water by chitosan [J]. Water Research, 2001, 35(16): 3904-3908.

[14] STRAND S P, NORDENG T, OSTGAARD K. Efficiency of chitosans applied for flocculation of different bacteria [J]. Water Research, 2002, 36: 4745-4752.

[15] 马青山,贾瑟,孙丽珉. 絮凝化学和絮凝剂 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 131-135.

(下转第 94 页)

矿井排水水质完全满足农业灌溉要求,通过建设灌溉渠道,把矿井水引至周边农田,以满足农田灌溉用水需求,减少泉群开采量。

3.3 科学开采泉域内地下水

在泉口出水量有足够保证的情况下,可适量开采,但应合理布局,全面控制,严格禁止增加新的地下水开采工程。

4 结 语

通过调查研究,基本查明了龙门泉群断流的原因及影响因素,同时提出了切合实际的防治对策,为龙门泉域地下水资源环境治理工作提供了科学依据。2011年9月洛阳市政府组织实施了龙门泉群复涌综合治理工作,通过减少龙门及常村煤矿的矿坑排水使龙门泉群成功复涌,使龙门泉群恢复了昔日泉涌水淌的秀丽景色,有效保护了龙门石窟及景区的生态环境,有利于专家学者更加全面地研究龙门石窟文化,将世界文化遗产的美丽自然景观更加靓丽地呈现在中外游客面前。

参考文献:

[1] 王春帅,梁毅,施强,等. 关于龙门石窟景区泉水间歇性

(上接第86页)

[9] DOXARAN D, FROIDEFOND J M, CASTAING P A, et al. Reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23):5079-5085.

[10] DOXARAN D, FROIDEFOND J M, LAVENDER S, et al. Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1):149-161.

[11] MOORE G F, AIKEN J, LAVENDER S J, et al. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in case II waters:

(上接第90页)

[16] 潘纲,张明明,闫海,等. 黏土絮凝沉降铜绿微囊藻的动力学及其作用机理[J]. 环境科学, 2003, 24(5):1-10. (PAN Gang, ZHANG Mingming, YAN Hai, et al. Kinetics and mechanism of removing *Microcystis aeruginosa* using clay flocculation [J]. Environmental Science, 2003, 24(5):1-10. (in Chinese))

[17] 余志,王仕汇. 天然黏土治理赤潮的研究进展[J]. 山西建筑, 2008, 34(1):191-192. (YU Zhi, WANG Shihui. Research advancement on controlling red tide by natural clay[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(1):191-192. (in Chinese))

[18] 黄斌,余国忠,栗印环. 沸石去除铜绿微囊藻的试验研究[J]. 信阳师范学院学报, 2004, 17(4):433-436.

断流影响因素的分析[J]. 地下水, 2009, 31(2):56-62. (WANG Chunshuai, LIANG Yi, SHI Qiang, et al. Analysis of influencing factors of spring water intermittent zero flow in Longmen Grotto Scenic Region[J]. Groundwater, 2009, 31(2):56-62. (in Chinese))

[2] 王建锋. 龙门石窟区域岩溶环境系统及其对石窟文物保护的影响[D]. 武汉:中国地质大学, 1992. :60-73.

[3] 张先,周亮. 许昌麦岭水源地可开采量的水均衡法计算[J]. 水文地质工程地质, 2004(1):83-87. (ZHANG Xian, ZHOU Liang. Calculation of the allowable withdrawal of groundwater in the Mailing wellfield near Xuchang with the water balance method [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(1):83-87. (in Chinese))

[4] 曹少娟,丁万根,周拓疆. 常村煤矿矿井充水规律及防治对策[J]. 中州煤炭, 2009(11):103-108. (CAO Shaojuan, DING Wangen, ZHOU Tuojiang. Water filling law and countermeasures of Changcun Coal Mine [J]. Zhongzhou Coal, 2009(11):103-108. (in Chinese))

[5] 申志雄. 长治市煤炭开采对水资源的影响及对策[J]. 山西水利科技, 2011(1):74-79. (SHENG Zhixiong. Impact of coal mining on water resources and countermeasure of Changzhi City[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2011(1):74-79. (in Chinese))

(收稿日期:2012-11-05 编辑:徐 娟)

application to MERIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(9):1713-1733.

[12] 荆红卫,华蕾,孙成华,等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3):357-363. (JING Hongwei, HUA Lei, SUN Chenghua, et al. Analysis on urban lakes eutrophication status in Beijing[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(3):357-363. (in Chinese))

[13] 杜桂森,吴玉梅,扬忠山,等. 北京城区河湖水质分析[J]. 湖泊科学, 2005, 17(4):373-377. (DU Guisen, WU Yumei, YANG Zhongshan, et al. Analysis of water quality on urban rivers and lakes in Beijing[J]. Journal of Lake Science, 2005, 17(4):373-377. (in Chinese))

(收稿日期:2013-01-15 编辑:徐 娟)

(HUANG Bin, YU Guozhong, LI Yinhuan. Removing of *Microcystis aeruginosa* by use of zeolite powder [J]. Journal of Xinyang Normal University, 2004, 17(4):433-436.)

[19] 赵杏媛,张有瑜. 黏土矿物与黏土矿物分析[M]. 济南:海洋出版社, 1990:45-48.

[20] 邹华,潘纲,阮文权. 壳聚糖改性黏土絮凝除藻的机理探讨[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(5):8-9, 13. (ZOU Hua, PAN Gang, RUAN Wenquan. Mechanism of flocculation and removal of *Microcystis aeruginosa* by chitosan-modified clays [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(5):8-9, 13. (in Chinese))

(收稿日期:2013-01-23 编辑:高渭文)