

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.06.13

Fe 掺杂 A-TiO₂ 在溴甲酚绿中的可见光催化活性及动力学

张一兵^{1,2}, 冯永青¹, 谢丽丽¹, 张素霞¹, 李素云¹

(1. 上饶师范学院化学与环境科学学院, 江西 上饶 334001; 2. 江西省塑料制备成型重点实验室, 江西 上饶 334001)

摘要:以 FeCl₃ · 6H₂O 为 Fe 源, 采用水热法制备了 Fe 掺杂锐钛型 TiO₂ (A-TiO₂) 光催化剂。以溴甲酚绿为降解对象, 考察溴甲酚绿的初始浓度、催化剂用量、掺 Fe 量等因素对自制催化剂可见光催化降解反应的动力学方程的影响。结果表明: 在 40 W 白炽灯照射下, 当溴甲酚绿初始浓度为 10 mg/L (pH = 7)、催化剂的用量为 0.6 g/L、掺 Fe 量为 4% (摩尔分数)、室温下反应时间为 3 h 时, 溴甲酚绿的降解率最大为 76.05%。溴甲酚绿光催化降解曲线符合一级反应动力学方程, 于上述最佳条件下其表观反应速率常数 k 达到最大值, 为 0.3897 h⁻¹。

关键词: Fe 掺杂 A-TiO₂; 可见光; 光催化降解; 溴甲酚绿; 动力学

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2017)06-0087-05

Visible light catalytic activity and kinetics of Fe-doped A-TiO₂ in bromocresol green

ZHANG Yibing^{1,2}, FENG Yongqing¹, XIE Lili¹, ZHANG Suxia¹, LI Suyun¹

(1. School of Chemistry and Environmental Science, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Plastics Preparation and Molding, Shangrao 334001, China)

Abstract: Fe-doped anatase TiO₂ (A-TiO₂) photocatalyst was prepared through a hydrothermal procedure by using FeCl₃ · 6H₂O as the iron source. With bromocresol green taken as degradation target, the bromocresol green's initial concentration, TiO₂ dosage, amount of iron-doped were investigated for their effects on kinetic equation of catalytic degradation reaction by visible light of self made catalyst. The results showed that the degradation rate 76.05% of bromocresol green was the maximum figure under the following optimal conditions: bromocresol green's initial concentration ρ_0 10 mg/L (pH = 7), catalyst dosage m 0.6 g/L, amount of iron-doped 4 % (molar fraction), and irradiated by 40 W filament lamp for $t = 3$ h at room temperature. The photocatalytic degradation curve of bromocresol green conformed to the first-order reaction kinetic equation. Under the above optimum conditions, the observed reaction rate constant K achieved the maximum value of 0.3897 h⁻¹.

Key words: Fe-doped A-TiO₂; visible light; photocatalytic degradation; bromocresol green; kinetics

染料作为一种精细化工产品, 存在于我们生活的方方面面, 给我们的生活带来了很大的方便。但是染料生产过程中排放的废水, 由于表现为高浓度、高色度、高 COD 和 BOD, 很难将其降解, 给环境尤其

基金项目: 教育部第四批高等学校特色专业建设点资助项目 (TS11524); 江西省精品课程资助项目 (赣教高字[2011]74 号); 江西省精品资源共享课资助项目 (赣教高字[2015]79 号)

作者简介: 张一兵 (1963—), 男, 教授, 硕士, 主要从事无机化学与无机材料研究。E-mail: srxbyb@163.com

是水资源带来了巨大的威胁^[1-2]。溴甲酚绿,学名3,3',5,5'-四溴间甲酚磺酞酞,主要用于指示剂、染料,是一种典型的难降解的有机污染物。传统的染料污水处理方法有物理法、化学法、生物法等。物理方法只将有机物污染物转移,而没有把染料分子真正分解,并不能实现真正意义上的去除污染物;化学或生物方法也不能高效地降解它们,因为这些物质分子中含有多个苯环,结构稳定难以降解,且当前使用的生物、化学等降解方法成本高,推广受限^[3]。

自从1972年报道了在受辐照的TiO₂上能发生水的氧化还原反应并释放出氢气和大量能量以来,利用TiO₂作为光催化剂催化降解水中污染物受到广泛的关注^[4-13]。TiO₂是一种无毒高效的催化剂,它以价廉、性能稳定、可循环利用而受到青睐,是一种理想的光催化剂。不足的是,TiO₂是宽带半导体,只有在紫外光下(占太阳光3%~4%)才有催化活性,即,它不能有效利用占太阳光中绝大多数的可见光。另外,由于紫外光的使用对环境 and 操作者有危害,故充分利用可见光照射实现其催化效能意义重大。为了扩展TiO₂的响应波长,掺杂改性成为近年来的关注热点^[4-7,10-13],但有关TiO₂光催化降解有机污染物的动力学研究相对较少^[5-7]。本研究以FeCl₃·6H₂O为Fe源,采用水热法制备Fe掺杂锐钛型TiO₂(A-TiO₂)光催化剂,以溴甲酚绿为降解对象,探讨其可见光催化过程的动力学行为。

1 实验设计

1.1 主要仪器和试剂

UV-1201 紫外可见分光光度计(上海普天分析仪器有限公司);X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)(Dmax/2500, Rigaku, Japan);溴甲酚绿和FeCl₃·6H₂O均为分析纯(中国上海试剂一厂);水为二次蒸馏水;其他试剂均为分析纯。

1.2 掺Fe A-TiO₂的制备

以FeCl₃·6H₂O为Fe源,参照文献[8]采用水热法制备掺Fe的A-TiO₂,并用XRD表征以确保产物晶型是锐钛型。

1.3 光催化实验方法

把一定量溴甲酚绿固体粉末溶于水(用少量乙醇助溶)配成一定浓度的溴甲酚绿溶液,以95%乙醇作参比在其最大吸收波长616 nm处,测定甲苯溶液的初始吸光度。用可见分光光度计测定溶液的最初吸光度,准确移取该浓度的溴甲酚绿溶液50 mL到一干燥、洁净的200 mL烧杯中,加入一定量的自制A-TiO₂粉末(掺Fe),密封杯口后置于室温下的自制暗箱中,磁力搅拌下用40 W白炽灯照射,反应一

定时间后取出少许反应液离心过滤后检测溶液的吸光度,并通过以下公式计算溴甲酚绿的降解率:

$$D = \left(1 - \frac{A_t}{A_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: D 为溴甲酚绿的降解率; A_t 为溶液的吸光度; A_0 为苯溶液的初始吸光度。

2 结果与讨论

2.1 XRD物相分析

图1为自制的掺Fe量4%(摩尔分数,下同)的TiO₂晶体粉末的XRD图。分析图1可知,衍射图谱中出现了各晶面的特征衍射峰,其 2θ 主要为25.41°、38.01°、48.01°、54.71°、63.11°处的特征衍射峰,分别对应于A-TiO₂晶体(101)、(004)、(200)、(105)和(204)晶面,说明本研究所制备的TiO₂粉末晶体均属锐钛矿型,即为A-TiO₂。各衍射峰峰形尖锐,说明产物粉体结晶度高。图1没有出现氧化铁的特征衍射峰,可能是掺Fe量极少或很好地分散而难以检测到,或因晶体中的掺Fe量少,Fe³⁺替代Ti⁴⁺进入TiO₂晶格中了。

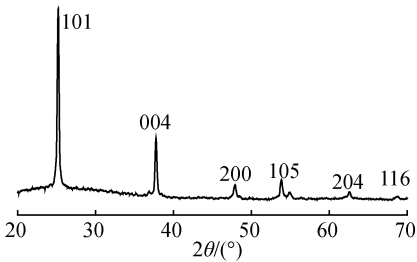


图1 自制的掺Fe量4% TiO₂粉末的XRD图

2.2 溴甲酚绿溶液最大吸收波长的确定

图2是波长600~625 nm范围内对一定浓度的溴甲酚绿溶液的吸光度光谱扫描结果,从图2可以发现,在波长等于616 nm时,溴甲酚绿溶液的吸光度最高,为0.334,因此,后续的实验中都把波长调到616 nm。

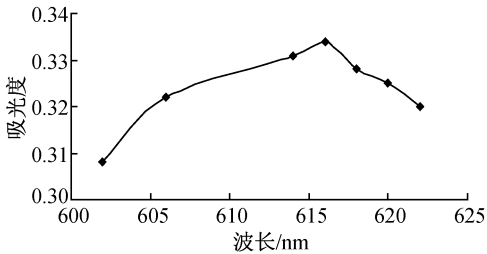


图2 溴甲酚绿溶液吸光度扫描结果

2.3 不同溴甲酚绿初始浓度下的反应动力学

溴甲酚绿溶液的初始质量浓度 ρ_0 分别为2、5、10、15、18 mg/L, pH值为7,自制掺Fe量为4%的催化剂质量浓度为0.6 g/L,室温磁力搅拌下可见光照

(40 W 白炽灯,下同)3 h 的条件下,图 3 为溴甲酚绿在不同初始浓度下光催化降解曲线,可见 $\ln(\rho_0/\rho_t) \sim t$ 间存在良好的线性关系,溴甲酚绿溶液的可见光催化降解速率与时间符合一级动力学规律,直线的斜率就是表观反应速率常数 k 。不同初始浓度下溴甲酚绿的动力学方程及参数见表 1。

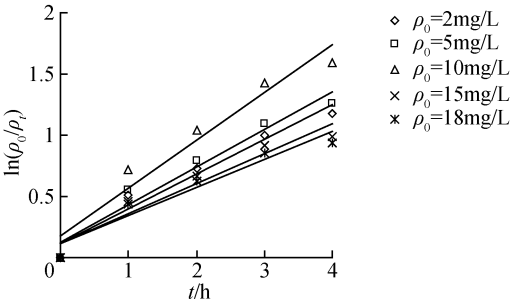


图3 溴甲酚绿在不同初始质量浓度下光催化降解曲线

表 1 不同初始浓度下溴甲酚绿的动力学方程及参数

$\rho_0/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	动力学方程	k / h^{-1}	R^2	$t_{1/2} / \text{h}$
2	$y = 0.2847x + 0.1128$	0.2847	0.9605	2.43
5	$y = 0.3064x + 0.1259$	0.3064	0.9564	2.26
10	$y = 0.3897x + 0.1782$	0.3897	0.9444	1.78
15	$y = 0.2437x + 0.1197$	0.2437	0.9341	2.84
18	$y = 0.2296x + 0.1109$	0.2296	0.9369	3.02

注： $t_{1/2}$ 是降解反应的半衰期， $t_{1/2} = 0.693/k_0$ 。

图 4 为溴甲酚绿的初始光降解速率 r_0 与 ρ_0 关系,可见 k 和 D 随着溴甲酚绿初始浓度的增大逐渐增大,当 $\rho_0 = 10 \text{ mg/L}$ 时, k 和 D 达到最大,分别为 0.3897 h^{-1} 和 76.05% , 溴甲酚绿的初始浓度继续增大, k 和 D 均变小。

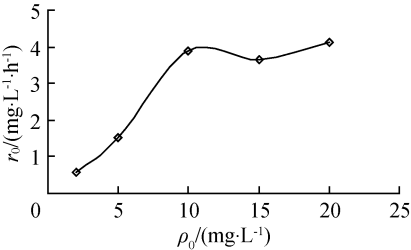


图 4 初始光降解速率与初始质量浓度的关系

由于催化剂表面上的光生电子 e^- 和空穴 h^+ 的复合较快 (低于 10^{-9} s 内完成), 而载流子被俘获的速率相对较慢 (一般在 $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ s}$), 故只有吸附在催化剂表面的有机污染物才有可能发生反应^[8]。然而当催化剂用量一定则其表面积就一定, 即其吸附容量是恒定值。因此反应开始时, 随着 ρ_0 的增大溴甲酚绿在 A-TiO_2 催化剂表面上的吸附量增大, 增加了催化降解的机会, k 、 D 随之增大; 当 ρ_0 增加至一定值时, 吸附呈饱和状态, k 、 D 值达到最大; 继续加大 ρ_0 , 过量的溴甲酚绿因在 A-TiO_2 晶体表面的吸

附, 减少了反应所产生 TiO_2 的活性中心, 加上生成的中间产物的吸附竞争, 均导致活性部位减少, 导致 k 、 D 减小或光催化剂失活^[10]。

2.4 不同催化剂用量的反应动力学

溴甲酚绿溶液的初始浓度 ρ_0 为 10 mg/L , pH 值为 7, 以自制掺 Fe 量为 4% 的 A-TiO_2 为催化剂, 其用量 m 分别为 0.2 、 0.4 、 0.6 、 0.8 、 1.0 g/L , 室温磁力搅拌下可见光照 3 h 的条件下, 光催化降解曲线见图 5。可见 $\ln(\rho_0/\rho_t) \sim t$ 间存在良好的线性关系, 溴甲酚绿溶液的可见光催化降解速率与时间符合一级动力学规律。溴甲酚绿在不同催化剂用量下动力学方程及参数见表 2。

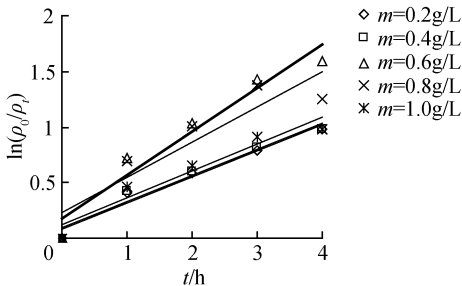


图 5 溴甲酚绿在不同催化剂用量下光催化降解曲线

表 2 溴甲酚绿在不同催化剂用量下动力学方程及参数

$m/$ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	动力学方程	k / h^{-1}	R^2	$t_{1/2} / \text{h}$
0.2	$y = 0.2344x + 0.0813$	0.2344	0.9703	2.96
0.4	$y = 0.2368x + 0.0893$	0.2368	0.9646	2.93
0.6	$y = 0.3897x + 0.1782$	0.3897	0.9444	1.78
0.8	$y = 0.3178x + 0.2308$	0.3178	0.8361	2.18
1.0	$y = 0.2417x + 0.1184$	0.2417	0.9344	2.87

由图 5 和表 2 可见, 当催化剂用量为 $0.2 \sim 0.6 \text{ g/L}$, 溴甲酚绿的 k 和 D 随着催化剂用量的增加而增加, 当 $m = 0.6 \text{ g/L}$ 时均达到最大值, 分别为 0.3897 h^{-1} 和 76.05% ; 当催化剂用量超过 0.6 g/L 时, k 和 D 却反而下降。原因是适当增加催化剂用量能增加电子 e^- - 空穴 h^+ 对的生成数量, 同时也增加降解物与掺 Fe A-TiO_2 颗粒表面的接触概率, 故 k 和 D 能增大; 当催化剂用量过大时, 过量 A-TiO_2 粉末颗粒使得溶液浑浊度加大, 造成光散射、光路堵塞等现象, 阻碍反应体系对光的吸收效率, 造成 k 、 D 减小^[11]; 另外, 过量使用催化剂会导致粉末团聚, 降低 A-TiO_2 表面活性点位对降解物及可见光的吸附, 结果减少电子 e^- - 空穴 h^+ 对和光生 $\cdot \text{OH}$ 的数量, 降低光催化降解效率, 同时因浪费催化剂, 增加了成本^[11]。

2.5 不同掺 Fe 量下的反应动力学

溴甲酚绿溶液的初始浓度为 10 mg/L , pH 值为 7, 掺 Fe 量 χ 分别为 0 、 0.8% 、 1.4% 、 4% 、 6% 、 7% 的 A-TiO_2 用量 m 均为 0.6 g/L , 室温磁力搅拌下可见光

照 3 h 的条件下,溴甲酚绿在不同掺 Fe 量下的光催化降解曲线见图 6。由图 6 可见 $\ln(\rho_0/\rho_t) \sim t$ 间存在良好的线性关系,溴甲酚绿溶液的可见光催化降解速率与时间符合一级动力学规律。溴甲酚绿在不同掺 Fe 量下动力学方程及参数见表 3。

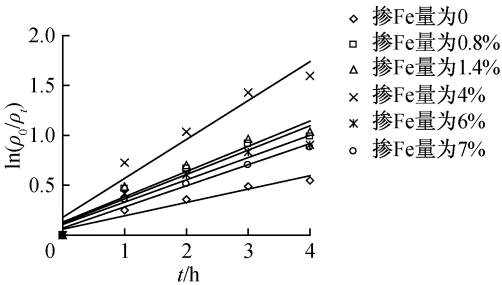


图 6 溴甲酚绿在不同掺 Fe 量下的光催化降解曲线

表 3 溴甲酚绿在不同掺 Fe 量下动力学方程及参数

$\chi/\%$	动力学方程	k/h^{-1}	R^2	$t_{1/2}/\text{h}$
0	$y = 0.1329x + 0.0608$	0.1329	0.9444	3.59
0.8	$y = 0.2437x + 0.1197$	0.2437	0.9341	2.84
1.4	$y = 0.2545x + 0.1262$	0.2545	0.9320	2.72
4.0	$y = 0.3897x + 0.1782$	0.3897	0.9444	1.78
6.0	$y = 0.2227x + 0.1066$	0.2227	0.9382	3.11
7.0	$y = 0.2118x + 0.0669$	0.2118	0.9750	3.27

由图 6 和表 3 可见,掺 Fe 能提高 A-TiO₂ 粉末光催化效率。当掺 Fe 量为 0~4% 时,随着掺 Fe 量的增加,溴甲酚绿的 k 和 D 增加;当掺杂量 4% 时, k 和 D 分别为 0.3897 h⁻¹ 和 76.05%,均为最大值;继续增加掺 Fe 量, k 和 D 却逐渐降低。花朵等^[11] 认为金属离子存在一个最佳掺杂量,当掺 Fe 量低于最佳值时,A-TiO₂ 粉末晶体中俘获载流子的陷阱相应少,此时催化效率随掺 Fe 量的增加而增加;当掺 Fe 量高于最佳值时,增加掺 Fe 量会减小陷阱间的平均距离,电子 e⁻ - 空穴 h⁺ 的复合速度呈指数级增长。此外过高的掺 Fe 量,多余的 Fe 会以氧化物形式沉积在 A-TiO₂ 晶体表面上,充当电子 e⁻ - 穴 h⁺ 的复合中心,造成光催化效率性能下降^[12-13]。本研究表明确定最佳掺 Fe 量为 4%。

3 结 论

a. 以 FeCl₃ · 6H₂O 为 Fe 源,用水热法自制了 Fe 掺杂 TiO₂ 粉末,XRD 表征确认为锐钛型。用自制 Fe 掺杂 A-TiO₂ 可见光催化降解溴甲酚绿最佳条件为:溴甲酚绿初始浓度为 10 mg/L、催化剂用量为 0.6 g/L,pH 值为 7、掺 Fe 量为 4% (摩尔分数)、室温搅拌下于暗箱中用 40 W 白炽灯照射 3 h,溴甲酚绿的降解率最大为 76.05%。

b. Fe 掺杂 A-TiO₂ 可见光催化降解溴甲酚绿反应为一级动力学反应,符合 Langmuir-Hinshelwood

规律,在上述最佳条件下,其表观反应速率常数达到最大值,为 0.3897 h⁻¹。

参考文献:

[1] 董丽丽. 有机染料废水处理的新技术研究 [J]. 云南环境科学,2002,21 (3):49-51. (DONG Lili. Research on new technology of organic dyestuff waste water treatment [J]. Yunnan Environmental Science,2002,21 (3):49-51. (in Chinese))

[2] 宋筱,朱翩翩,陈盼,等. 磁性 Fe₃O₄/碳纳米管复合材料光催化处理刚果红染料废水 [J]. 水资源保护,2015,31(5):77-81. (SONG Xiao,ZHU Pianpian,CHEN Pan,et al. Study on photocatalytic removal of Congo Red dye wastewater using magnetic Fe₃O₄/Carbon nanotubes composite[J]. Water Resources Protection,2015,31(5):77-81. (in Chinese))

[3] 许凤秀,冯光建,刘素文,等. TiO₂ 降解有机染料废水的研究进展 [J]. 硅酸盐通报,2008,27(5):991-995. (XU Fengxiu,FENG Guangjian,LIU Suwen,et al. Advances in degradation of the dyestuffs waste water with TiO₂ [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2008,27(5):991-995. (in Chinese))

[4] 刘少友,冯庆革,唐文华,等. S、Al 掺杂 TiO₂ 纳米材料的固相合成及其可见光降解性能 [J]. 无机化学学报,2011,27(4):673-681. (LIU Shaoyou,FENG Qingge,TANG Wenhua,et al. S and Al doped TiO₂ nanomaterials: synthesis via solid-state reaction and visible light degradation performance [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry,2011,27(4):673-681. (in Chinese))

[5] 郑旭煦,於煌,殷钟意,等. N 掺杂纳米 TiO₂ 在 4-氯苯酚中的可见光催化活性及动力学研究 [J]. 材料工程,2008,60(10):39-42. (ZHENG Xuxu,YU Huang,YIN Zhongyi,et al. Catalytic activity and kinetic equation of nitrogen-doped TiO₂ nanoparticle for 4-chlorophenol under visible light [J]. Journal of Materials Engineering,2008,60(10):39-42. (in Chinese))

[6] 暴勇超,李小丽,刘娟,等. TiO₂-SnO₂ 纳米粒子超声波光催化降解尤丽特蓝的动力学研究 [J]. 太阳能学报,2010,31(3):286-290. (BAO Yongchao,LI Xiaoli,LIU Juan,et al. Study on kinetics of TiO₂-SnO₂ nanoparticles sono-photocatalytic degradation of solvent blue [J]. Acta Energaie Solaris Sinica,2010,31(3):286-290. (in Chinese))

[7] LIU Y,CHEN X,LI J,et al. Photocatalytic degradation of azodyes by nitrogen-doped TiO₂ nanocatalysts [J]. Chemosphere,2005,61(1):11-18.

[8] 张一兵. 锐钛矿型 TiO₂ 微米球的制备表征 [J]. 材料科学与工程学报,2010,28(6):916-919. (ZHANG Yibing. Preparation and characterization of anatase TiO₂ microspheres by hydrothermal reaction [J]. Journal of Materials Science and Engineering,2010,28(6):916-919. (in Chinese))

[9] 李青松,高乃云,马晓雁,等. TiO₂ 光催化降解水中内分泌

干扰物 17 β -雌二醇[J]. 环境科学,2007,28(1):120-125. (LI Qingsong,GAO Naiyun,MA Xiaoyan,et al. Photocatalytic endocrine disruptor 17 β -estradiol(E2) in drinking water by nanotitanium suspended system [J]. Environmental Science, 2007,28(1):120-125. (in Chinese))

[10] 程玉红,周婷,何璇,等. 纳米锐钛矿 TiO₂及负载金催化剂的制备与催化性能[J]. 材料导报 B,2012,26(7):25-28. (CHENG Yuhong, ZHOU Ting, HE Xuan, et al. Preparation and catalytic performance of nano-anatase titania and supported gold catalysts[J]. Materials Review B,2012,26(7):25-285. (in Chinese))

[11] ALHAKIMI G,STUDNICKI L H,AL G M. Photocatalytic destruction of potassium hydrogen phthalate using TiO₂ and sunlight [J]. Photochemical Photobiology A, 2003,

154(2/3):219-228.

[12] 花朵,施春红,袁蓉芳,等. 金属掺杂对纳米管 TiO₂光催化性能的影响[J]. 功能材料,2013,21(44):3163-3167. (HUA Duo,SHI Chunhong,YUAN Rongfang,et al. Effect of metal ion-doping on photo catalytic activity of TiO₂ nanotubes[J]. Journal of Functional Materials,2013,21(44):3163-3167. (in Chinese))

[13] 彭峰,任艳群. TiO₂-SnO₂ 复合纳米膜的制备及其光催化降解甲苯的活性[J]. 催化学报,2003,24(4):243-247. (PENG Feng, REN Yanqun. Preparation of nano-TiO₂-SnO₂ composite film and its photocatalytic activity for toluene degradation [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2003,24(4):243-247. (in Chinese))

(收稿日期:2016-11-28 编辑:王 芳)

(上接第 78 页)

- b.** 入河排污口位置建议尽量设在河道底部,以提高河道水体的交换能力。
- c.** 尾水回用的流量越大,平均水龄相应的就越小,随之的经济成本就越高。

参考文献:

[1] 邢梦雅,徐慧,茹彪,等. 基于空间分析的城镇水系生态景观规划方法[J]. 水资源保护,2016,32(2):92-95. (XING Mengya, XU Hui, RU Biao, et al. Ecological landscape planning method for urban river system based on spatial analysis[J]. Water Resources Protection,2016,32(2):92-95. (in Chinese))

[2] 曹淑敏,陈莹. 我国非常规水源开发利用现状及存在问题[J]. 水利经济,2015,33(4):47-49. (CAO Shumin,et al. Utilization status and problems of non-conventional water resources in China [J]. Journal of Economic of Water Resource,2015,33(4):47-49. (in Chinese))

[3] 唐天均,杨晟,尹魁浩,等. 基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟[J]. 湖泊科学,2014,26(3):393-400. (TANG Tianjun, YANG Sheng, YIN Kuihao, et al. Simulation of eutrophication in Shenzhen reservoir based on EFDC model[J]. Journal of Lake Sciences,2014,26(3):393-400. (in Chinese))

[4] 刘建波,余扬晖,刘洁,等. 基于 EFDC 模型研究文昌清澜潮汐汊道人类活动对水交换速率的影响[J]. 热带海洋学报,2014,33(3):24-32. (LIU Jianbo, YU Yanghui, LIU Jie, et al. The impact of human activities on water exchange in the Qinglan tidal inlet system based on the EFDC model [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2014,33(3):24-32. (in Chinese))

[5] 刘岩,赵智杰. 前海湾填海区的水龄特征及改善措施模拟[J]. 环境科学与技术,2015,38(2):162-168. (LIU Yan,ZHAO Zhijie. Simulation of water age characteristics and improving measures in the sea filling region of Qianhai Bay [J]. Environmental Science & Technology,2015,38(2):162-168. (in Chinese))

[6] 郝文彬,唐春燕,滑磊. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(2):129-133. (HAO Wenbin,TANG Chunyan, HUA Lei. Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(2):129-133. (in Chinese))

[7] 李一平,滑磊,王沛芳,等. 河道型水库水动力特征与气候条件的响应关系[J]. 湖泊科学,2013,25(3):317-323. (LI Yiping, HUA Lei, WANG Peifang, et al. Responses of hydrodynamical characteristics to climate conditions in a channel-type reservoir [J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(3):317-323. (in Chinese))

[8] HAMRICK J M, WU T S. Computational design and optimization of the EFDC/HEM3D surface water hydrodynamic and eutrophication models[C]//Next generation environmental models and computational methods. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics,1997:143-161.

[9] 龚然,徐进,徐力刚,等. 基于 EFDC 城市景观湖泊水动力模拟研究[J]. 环境工程,2015,33(4):58-62. (GONG Ran,XU Jin,XU Ligang,et al. Study on hydrodynamics in urban landscape lake based on EFDC [J]. Environmental Engineering,2015,33(4):58-62. (in Chinese))

[10] 戚文,李一平,王莹,等. 基于 EFDC 模型的天镜湖水动力优化调控方案研究[J]. 水电能源科学,2015,33(4):58-62. (QI Wen, LI Yiping, WANG Ying, et al. Control and optimization scheme of Tianjing Lake hydrodynamics based on EFDC Mode [J]. Water Resources and Power,2015,33(4):58-62. (in Chinese))

[11] LI Y,TANG C,WANG C,et al. Improved Yangtze River diversions;are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu,China? [J]. Ecological Engineering,2013,51(1):104-116.

[12] DELLHEZ E J M, CAMPIN J M, HIRST A C, et al. Toward a general theory of the age in ocean modelling [J]. Ocean Modelling,1999,1(1):17-27.

(收稿日期:2017-04-19 编辑:徐 娟)