

鼓泡塔内气液两相流动特性数值模拟研究

魏文礼, 邵世鹏, 刘玉玲
(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 利用 CFD 软件模拟的方法研究鼓泡塔内气液两相流动特性, 为鼓泡塔的设计提供依据。采用欧拉-欧拉双流体模型分别结合标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型和 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对鼓泡塔内气液两相流进行数值模拟, 并使用 Phase Coupled SIMPLE 算法进行速度与压力耦合求解。比较鼓泡塔内轴截面 ($y=0$) 处不同高度液相速度和气相速度的变化情况, 发现速度沿径向呈现出抛物线分布, 沿水深方向越接近通气孔, 速度越大, 且气相速度整体大于液相速度。通过将 $z=0.28\text{ m}$ 处的垂向液相速度与实验值比较, 得出欧拉-欧拉双流体模型结合标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型模拟鼓泡塔气液两相流动特性优于 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 且发现上升力对模拟结果有显著的影响。

关键词: 欧拉-欧拉双流体模型; 气液两相流动; 动力特性; 液相速度

中图分类号: TV13; O359

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0013-05

Numerical simulation of dynamic characteristics of gas-liquid flow in a bubble column

WEI Wenli, SHAO Shipeng, LIU Yuling
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to provide a basis for the design of bubble columns, the paper studied two-phase flow dynamic characteristic in a bubble column by using the CFD software. It used Euler-Euler two-fluid model along with standard $k-\varepsilon$ turbulence model and RNG $k-\varepsilon$ turbulence model to simulate the gas-liquid two-phase in the bubble column, and took the Phase Coupled SIMPLE algorithm to solve velocity and pressure. The comparisons of velocities of gas and liquid at different heights in the middle section ($y=0$) of the bubble column show that the velocity distribution in the radial direction is parabolic, and the closer the position is to the vent along the depth direction, the greater the velocity is, and the vertical velocity of gas phase is greater than that of liquid phase. By comparing the vertical liquid velocities with experimental values at the height of $z=0.28\text{ m}$, it obtained that the Euler-Euler two-fluid model combined with standard $k-\varepsilon$ turbulent two-phase flow model is better than RNG $k-\varepsilon$ model in simulating the dynamic characteristics of bubble columns, and the lift force has significant impact on simulation result.

Key words: Euler-Euler two-fluid model; gas-liquid flow; dynamic characteristics; liquid phase velocity

鼓泡塔反应器在化学、石油化工等领域有广泛的应用, 在很多实际工程问题中, 都需要对鼓泡塔内气液两相流的流动特性进行研究, 因此预测流体动力学特性对鼓泡塔反应器的设计和发展具有重要意义。鼓泡塔底部充气后带动塔内水流运动属于典型的气泡羽流流动, 气相和液相之间相互混掺剧烈。在早期的研究中, 主要是对气泡羽流流动参数进行测量, 如 Becker 等^[1] 和 Pfleger 等^[2] 对鼓泡塔内液

相速度和含气率分布等参数进行了测量分析; Vivek^[3] 等对矩形鼓泡塔内气液两相流动进行了试验和数值模拟研究, 讨论了气体速度、分布器设计方式等因素对气液两相流水力特性的影响; 肖柏青等^[4] 通过试验证实了曝气池边壁可以对气泡羽流产生明显的附壁效应, 且研究结果表明气泡羽流倾斜角度受控于盘壁距离和通气量, 一般来说, 盘壁距离越小, 通气量越大, 倾斜角度越大, 说明受到的附

收稿日期: 2014-06-18; 修回日期: 2014-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178391); 陕西省科学研究计划项目(2014K15-03-05); 陕西省西北旱区生态水利国家重点实验室开放基金(106-221223); 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-00X101)

作者简介: 魏文礼(1965-), 男, 陕西大荔人, 博士, 教授, 主要从事环境水力学、水污染控制理论与技术研究。

壁效应影响越强烈。随着计算流体动力学的发展,由于其耗时短、费用低等优点,采用数值模拟的方法对鼓泡塔内气泡浮力羽流进行研究也被越来越多的学者所接受。

目前,模拟的方法主要有欧拉-拉格朗日方法^[5]和欧拉-欧拉^[6]方法,而以欧拉-欧拉方法为基础的双流体模型得到了广泛的运用。并且根据相关学者的对比研究,认为欧拉-拉格朗日模型对低气流率下的气泡羽流模拟结果较好,适合对泡状流动作基础研究,欧拉-欧拉法适合较高的持液率和强烈的湍流情况^[7],对不同气流率下的气泡羽流均能得到较好的结果。

在国内也有许多学者对鼓泡塔内气液两相流动进行了研究,如李光等^[8]采用双流体模型以及考虑气相影响的湍流模型,对矩形鼓泡反应器中气液两相流行为进行了二维和三维数值模拟。结果表明,二维模拟不能准确预测气液两相流动态行为,而三维数值模拟则能准确模拟两相流动态行为;苏新军^[9]通过 CFX 软件捕捉塔顶部整个自由表面的特性,得出由“压力”出口边界和“开口”出口边界条件求得的数值结果差异很小;Li 等^[10]用数值模拟的方法研究了充气孔布置方式及充气孔数量对鼓泡塔内气液两相流的影响。

本研究以文献[11]的鼓泡塔试验为基础,分别采用欧拉-欧拉双流体模型结合标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型和 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对该试验进行模拟,通过模拟结果与相关试验数据的对比与分析,选择出模拟鼓泡塔内气泡浮力羽流的最佳模型,分析鼓泡塔内气泡羽流的流动特性,以期为提高鼓泡塔反应器混合效率提供依据。

1 数学模型

欧拉双流体模型的守恒方程由质量守恒方程和动量守恒方程组成。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

式中: t 为时间; n 为相数; $\alpha_q \rho_q$ 和 $\vec{v}_q$ 分别为 q 相的体积分数、密度和速度。 $\dot{m}_{pq}$ 为 p 相到 q 相的质量传递。因此,从质量守恒方程可得:

$$\dot{m}_{pq} = -\dot{m}_{qp} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{pp} = 0 \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\tau} +$$

$$\sum_{p=1}^n (\bar{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q (\bar{F}_q + \bar{F}_{lift,q} + \bar{F}_{vm,q}) \quad (4)$$

式中: p 为所有相共享的压力; $\bar{R}_{pq}$ 为相间相互作用力; $\bar{F}_q$ 为外部体积力; $\bar{F}_{lift,q}$ 为升力; $\bar{F}_{vm,q}$ 为虚拟质量力; $\vec{v}_{pq}$ 为 p 相相对于 q 相的速度; $\bar{\tau}$ 为第 q 相的压力应变张量,其计算公式为:

$$\bar{\tau} = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \vec{v}_q \nabla) + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \vec{v}_q \bar{I} \quad (5)$$

式中: μ_q 为 q 相的剪切力黏度; λ_q 为 q 相的体积黏度; $\bar{I}$ 为单位张量。

q 相的剪切力黏度 μ_q 的计算公式为:

$$\mu_q = \rho_q C_\mu \frac{k_q^2}{\varepsilon_q} \quad (6)$$

式中: C_μ 为常数,其值为 0.09; k_q 为 q 相的紊动动能; ε_q 为 q 相的紊动动能的耗散率。

q 相的紊动动能 k_q 和耗散率 ε_q 可以通过 $k-\varepsilon$ 紊流模型获得,其方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q k_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q k_q) = \\ \nabla(\alpha_q \frac{\mu_q}{\sigma_k} \nabla k_q) + \alpha_q G_{k,q} - \alpha_q \rho_q \varepsilon_q \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \varepsilon_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \varepsilon_q) = \\ \nabla(\alpha_q \frac{\mu_q}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_q) + \alpha_q \frac{\varepsilon_q}{k_q} (C_{1\varepsilon} G_{k,q} - C_{2\varepsilon} \rho_q \varepsilon_q) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $G_{k,q}$ 为 q 相紊动动能的产生速率; σ_k 、 σ_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为常数,其值分别为 1.0, 1.3, 1.44, 1.92^[12]。

以上方程组构成了求解鼓泡塔流场分布规律的封闭方程组,根据实际工况添加相应的边界条件后,就构成该方程组的定解问题。

2 物理模型与边界条件

模拟采用的模型尺寸为 0.15 m × 0.15 m × 1.00 m (图 1),矩形通气孔位于底部距离边壁 0.06 m 处。其边长为 0.03 m。初始液面高度为 0.45 m,气体表观速度为 0.0049 m/s。本研究将以该物理模型尺寸为基础,采用欧拉方法对其进行模拟。根据气泡羽流的流动特性以及多相流模型的适应性,多相流模型选用欧拉-欧拉模型,湍流模型分别选择标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型和 RNG $k-\varepsilon$ 模型分别进行模拟。模拟采用的模型区域图和网格图分别如图 1 和图 2 所示。

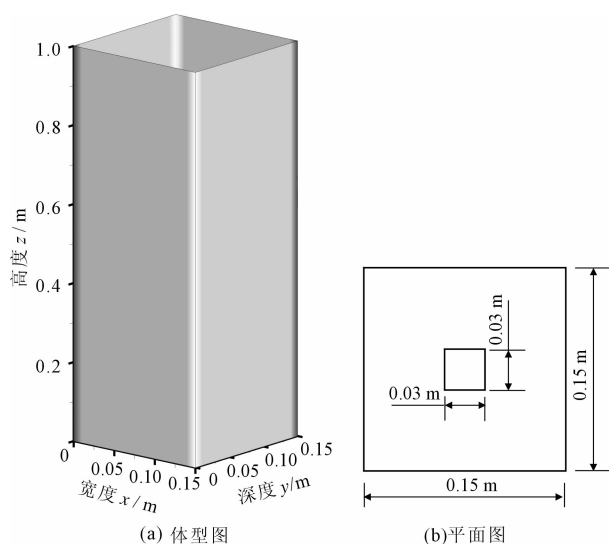


图1 计算区域图

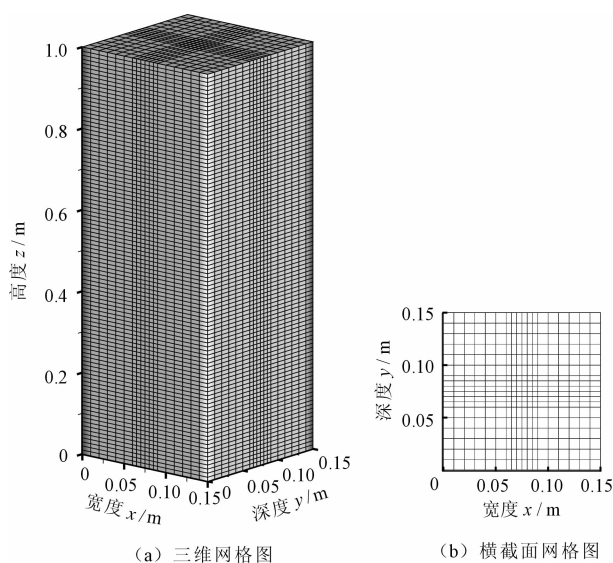


图2 计算网格图

空气进口边界条件采用速度进口,通气速度采用折算速度,折算方法^[11]如下:

$$v_{g \cdot in} = \frac{v_{g \cdot s} W D}{A_{in}} \quad (9)$$

其中: $v_{g \cdot s}$ 是气体表观速度,为 0.0049 m/s; W 是鼓泡塔宽度,为 0.15 m; D 是鼓泡塔深度,为 0.15 m; A_{in} 为通气孔面积,为 0.03 m × 0.03 m,得出通气速度 $v_{g \cdot in}$ 为 0.1225 m/s,假设气泡均匀准入,不考虑气泡破裂和合并。由于气相在水中属于分散相,而溢出水面以后,在空气层当中又属于连续相。因此对顶面出口边界的设置有多种选择,包括自由出流、压力出口以及速度进口。在底部通气速度很大,空气从顶面溢出以后造成水面的剧烈波动,且底部空气进入空气层区域以后变成连续相。在这种情况下,

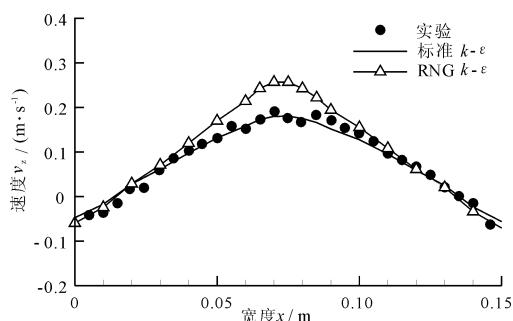
为避免模拟结果产生较大的误差,可在顶部设置速度进口,给一个较小的速度,以减小模拟误差。就本次模拟而言,由于通气速度相对较小,空气溢出水面以后对水面的影响也很小,因此顶面采用压力出口,相对压强为 0;计算区域初始水位为 0.45 m。模型底面和四周区域采用无滑移固壁边界,采用壁面函数法确定。模型的离散采用有限体积法;速度与压力耦合求解使用 Phase Coupled SIMPLE 算法。

3 计算结果与分析

3.1 模型比较

本研究采用欧拉-欧拉模型分别结合标准 $k-\varepsilon$ 和 $RNGk-\varepsilon$ 紊流模型进行模拟。为了讨论 2 种紊流模型在鼓泡塔计算模拟中的精确性,就 2 种模型对鼓泡塔中心截面特征高度 ($z = 0.28$ m) 处液相速度与实验值进行比较,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,当湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 时,实验值与计算值吻合非常好,而采用 $RNGk-\varepsilon$ 模型时计算的结果与计算值相比,在靠近边壁附近,与实验值吻合良好,而在中心处,计算值大于模拟值,误差约为 30%,从而验证了欧拉双流体模型结合标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型的精确性,因此本模拟选用欧拉模型结合标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型。

图3 采用标准 $k-\varepsilon$ 和 $RNGk-\varepsilon$ 模型时液相速度与实验值比较图

将计算的鼓泡塔中心截面 $z = 0.28$ m 处垂向液相速度与实验值比较(图 4),由图 4 可以看出在计算时只考虑拖曳力的情况下,液相速度的垂向速度变化趋势与实验值一致,但垂向速度在横向的扩散范围小,导致速度分布出现中间区域很大而靠近边壁处速度又很小的现象;为更好地模拟实际鼓泡塔内的气泡上升运动,将气泡上升时所受的拖曳力和上升力都考虑在内后,计算值与实验值吻合的非常好,这是因为气泡本身有大小,在上升的过程中会同时受到拖曳力和上升力的影响,且气相和液相之

间的剪切运动是通过上升力模拟的^[11],即上升力对模拟结果有显著的影响。

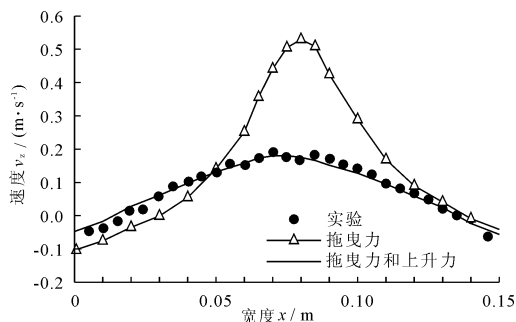


图4 $z = 0.28$ m 处不同界面作用力下实验与计算的垂向液相速度比较图

3.2 速度分析

由于鼓泡塔内气液两相流动是由于底部通入空气带动区域里面的水进行流动而形成的,由底部通入的空气是整个系统唯一的动力,气相和液相之间

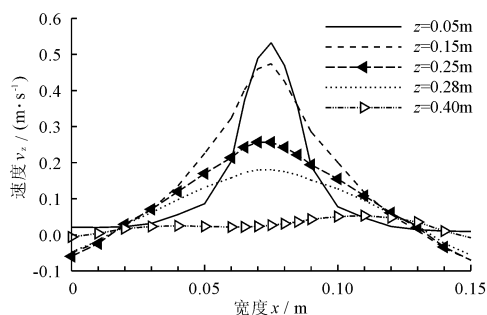


图5 不同水深液相速度比较

3.3 流场分析

从鼓泡塔中心截面流线图(图7)可以看出:

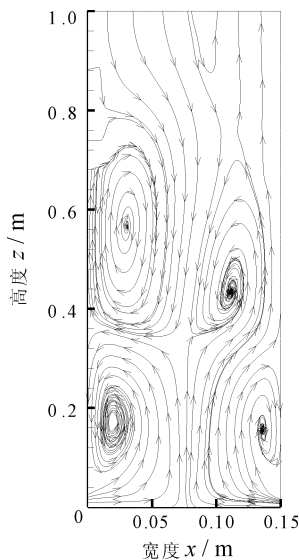


图7 鼓泡塔中心截面流线图

在 $z < 0.40$ m 的区域内,鼓泡塔底部通入空气

有速度差异。

图5和图6分别表示在 $y = 0$ m 截面不同水深处液相和气相的轴向速度。从不同水深液相速度比较图可以看出,在靠近充气孔附近的 $z = 0.05$ m 和 $z = 0.15$ m 平面,速度沿径向分布呈现出明显的抛物线形分布,而且峰值处速度比两边靠近边壁处速度大很多,且在边壁处速度为负值,这是因为由充气孔充入空气时,由于上升力的作用,空气气泡向上运动,带动周围水的向上运动,而水上升到一定高度,当上升力小于重力时,有一部分水开始沿着边壁下滑,因此速度为负值。随着高度增加,速度分布逐渐平缓,峰值也逐渐变小,说明充气孔附近空气对水流速度的影响随着水位的升高逐渐变小。从不同水深气相速度比较图可以看出,其分布趋势与液相速度分布趋势一致,但速度值总体高于液相速度值,且速度都为正值。

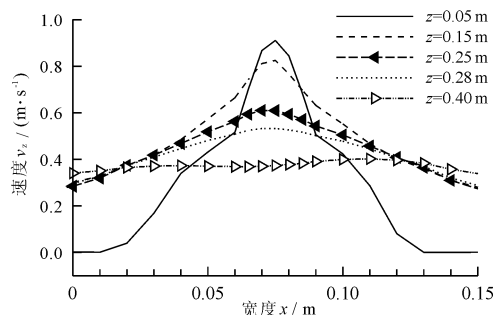


图6 不同水深气相速度比较

后带动充气孔附近区域水向上运动,当上升力小于重力时,靠近边壁处的水向下流动,由于上升水流和下降水流的相对剪切作用,在充气孔中心区域与边壁之间形成左右对称的回流。同时可以看出,在 $z > 0.40$ m 的区域内,一部分水沿着边壁向上运动然后在重力的作用下在鼓泡塔中心区域下落,在上部区域形成回流,但左右回流区结构不对称,这是因为上升气流左右摆动而导致的。

4 结 语

采用欧拉双流体模型结合标准 $k - \varepsilon$ 紊流模型和 RNG $k - \varepsilon$ 模型对鼓泡塔中气液两相流动力特性进行数值模拟得出以下结论:

(1)将拖曳力,上升力都考虑在内后模拟值与实验值吻合良好。

(2)通过与实验值比较得出欧拉双流体模型结合标准 $k - \varepsilon$ 紊流模型对模拟鼓泡塔内流场有更好的精确性。

(3)通过模拟得到了鼓泡塔中心($y = 0\text{m}$)截面不同高度处速度沿径向的分布规律,即速度呈现出抛物线分布,在水深方向越接近通气孔速度越大,波峰也越明显,且气相速度整体大于液相速度。

参考文献:

- [1] Becker S, Sokolichin A, Eigenberger G. Gas – liquid flow in bubble columns and loop reactors: II. Comparison of detailed experiments and flow simulations[J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(24): 5747 – 5762.
- [2] Pflieger D, Gomes S, Gilbert N, et al. Hydrodynamic simulations of laboratory scale bubble columns fundamental studies of the Eulerian – Eulerian modelling approach [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(21): 5091 – 5099.
- [3] Vivek V Buwa, Vivek V Ranade. Dynamics of gas – liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single/multi – group CFD simulations[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(22): 4715 – 4736.
- [4] 肖柏青, 张法星, 刘春艳, 等. 曝气池内气泡羽流附壁效应的试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 104 – 107 + 112.
- [5] Ashraf A B, Pushpavanam S. Analysis of unsteady gas – liquid flows in a rectangular tank: Comparison of Euler – Eulerian and Euler – Lagrangian simulations [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(3): 268 – 277.
- [6] Sheng Y Y, Irons G A. The impact of bubble dynamics on the flow in plumes of ladle water models[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1995, 26(3): 625 – 635.
- [7] Pan Y, Dudukovic M P, Chang M. Dynamic simulation of bubbly flow in bubble columns[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(13): 2481 – 2489.
- [8] 李光, 杨晓钢, 戴干策. 鼓泡塔反应器内两相流动态模拟研究[J]. 化学反应工程与工艺, 2008, 24(3): 220 – 227.
- [9] 苏新军. 鼓泡塔出口边界条件的数值模拟[J]. 化学工程, 2008, 36(12): 25 – 28.
- [10] Li Guang, Yang Xiaogang, Dai Gance. CFD simulation of effects of the configuration of gas distributors on gas – liquid flow and mixing in a bubble column[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(24): 5104 – 5116.
- [11] Deen N G, Solberg T, Hjertager B H. Large eddy simulation of the Gas – Liquid flow in a square cross – sectioned bubble column[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(21): 6341 – 6349.
- [12] 魏文礼, 李超. 锥阀附近水力特性的三维数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2011, 28(1): 108 – 112.
- [13] 程国栋, 肖洪浪, 陈亚宁, 等. 中国西部典型内陆河生态 – 水文研究[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 3 – 6.
- [14] 李杰人, 杨宁生, 徐忠法. 水产种质资源共享平台技术规范(下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 789 – 875.
- [15] 张金屯. 数量生态学[M]. (第2版). 北京: 科学出版社, 2011.
- [16] Komarkova J, Komarek O, Hejzlar J. Evaluation of the long term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon – shape reservoir using multivariate statistical methods[J]. Hydrobiologia, 2003, 504(1 – 3): 143 – 157.
- [17] 李晓钰, 于洪贤, 马成学. 松花江哈尔滨段浮游植物群落典范对应分析及多样性分析[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(10): 103 – 107.
- [18] 石晓丹, 阮晓红, 邢雅因, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 2999 – 3008.
- [19] Dale K S, Daniel C D, Richard A M, et al. Ecoregions and stream morphology in eastern Oklahoma[J]. Geomorphology. 2010, 122(1 – 2): 117 – 128.
- [20] Robert G, Bailey. Ecosystem Geography From Ecoregions to Sites[M]. Springer, New York, 2009.
- [21] Stamatis Z, Alcibiades N E, Panayotis D. Ecoregions in the Southern Balkans: Should their boundaries be revised [J]. Environmental Management, 2009, 43(4): 682 – 397.
- [22] 栾青杉, 孙军, 宋书群, 等. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 445 – 450.
- [23] 李鹏, 安黎哲, 冯虎元, 等. 黑河流域浮游植物及其地理分布特征研究[J]. 西北植物学报, 2001, 21(5): 966 – 972.
- [24] 李鹏, 李彩霞, 冯虎元, 等. 黑河流域浮游动物及其地理分布特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2000, 36(3): 191 – 192.
- [25] 高欣, 牛翠娟, 胡忠军. 太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3329 – 3336.
- [26] 路娜, 尹洪斌, 邓建才, 等. 巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 950 – 956.

(上接第12页)