

# 氧化沟内水力特性的数值模拟研究

魏文礼<sup>1</sup>, 张泽伟<sup>1</sup>, 吕彬<sup>2</sup>, 刘玉玲<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

**摘要:** 采用 FLUENT6.3.26 软件求解气液两相流, VOF (volume of fluid) 法捕捉自由液面, 气液两相流时均方程的求解应用标准湍流模型, 速度与压力耦合方程组的求解应用半隐式算法。分析比较了氧化沟内各测线上流速沿水深方向的变化规律, 将模拟结果与实验数据进行比较分析, 得出两者有很好的—致性, 从而验证了所选数值模型的正确性。为进一步研究氧化沟内部的流场结构和优化氧化沟的体型设计提供了参考依据。

**关键词:** 氧化沟; 数值模拟; 测线流速; 半隐式算法; 水力特性

中图分类号: X131.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)03-0143-05

## Numerical simulation of hydraulic characteristics in oxidation ditch

WEI Wenli<sup>1</sup>, ZHANG Zewei<sup>1</sup>, LÜ Bin<sup>2</sup>, LIU Yuling<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. China Water Resources Pearl River Planning Surveying Designing CO. LTD, Guangzhou 510610, China),

**Abstract:** The paper used FLUENT6.3.26 software to solve gas-liquid two-phase flow, and VOF (Volume of fluid) method to track free liquid surface, and standard turbulence model to solve the time-averaged equations of gas-liquid two phases flow, and the semi-implicit method to solve velocity and pressure coupling equations. It compared the change law of measuring line in oxidation ditch and analyzed simulated result and test data. The two results have a good agreement and identify the correctness of chosen model. The result can provide a reference for the optimization of oxidation ditch design and the efficient operation.

**Key words:** oxidation ditch; numerical simulation; velocity of measuring line; semi-implicit method; hydraulic characteristic

## 1 研究背景

在工业上氧化沟工艺常被用来改良活性污泥, 由于其消耗的有机负荷较低, 流体在其中停留时间较长, 在城市废水处理和污水系统中有着十分重要的用途。现阶段国内外学者对氧化沟工艺进行了实验方面及数值模拟方面的研究, 数值模拟方面的研究又分为: 氧化沟体型的优化、氧化沟内液体流态及流场特性的研究、氧化沟内不同位置污泥分布的研究、氧化沟内溶解氧分布及污泥沉降速率的模拟和节约能耗的研究等方面。

Diamantis 等<sup>[1]</sup>通过实验研究得出曝气转盘的

曝气速率及分布会影响一体化氧化沟内分层分布的结论。范茏等<sup>[2]</sup>测定了1个Carrousel氧化沟在安装倒伞形表曝机时的水力学特性, 用动态分析仪对表曝机的一侧流入、流出的颗粒沉速、液体速度、固体颗粒含量分布进行了测定和分析, 结果表明: 在离表曝机较远的位置固体物质含量增加, 在离表曝机较近处流速较大。许丹宇等<sup>[3]</sup>在Carrousel氧化沟中应用PIV技术测量了模型的曝气叶轮段、弯道、直道等处的三维流速, 对氧化沟内不同位置的流场结构进行了研究, 将垂向、横向、纵向沿程的流速分布作了详细的分析对比, 得出了氧化沟内垂向、纵向的流速分布决定了其内部的流场特性, 污泥的沉积位

收稿日期: 2015-09-23; 修回日期: 2015-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578452、51178391); 陕西省工业科技攻关项目(2016GY-180); 陕西省科学研究计划项目(2014K15-03-05)

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。

置由垂向、横向的流速分布决定,流速分布在外沟处距曝气叶轮的直道段较近区域上大下小,在距曝气叶轮的直道段较近区域上小下大。Argaman<sup>[4]</sup>从节约能耗及溶解氧的角度,通过实验研究了曝气转盘的转速与淹没深度。Hao Xiaodi等<sup>[5]</sup>通过实验的方法,对影响Pasveer氧化沟中反硝化作用、同步硝化的条件机制进行了研究,使氧化沟对除氮的效果有了进一步改善。Ushikubo等<sup>[6]</sup>将动物排泄物放在双沟道的氧化沟内进行了处理,通过实验研究得出该处理方式所消耗的日负荷为常规处理方式所需的3倍,处理后的各项指标都达到污水处理的标准。羊寿生等<sup>[7]</sup>提出了一种新型的氧化沟,该种氧化沟将曝气与沉淀两个工序融于同一构筑物内,并且可以根据处理水质的不同调节其运转周期。Xia Shibin等<sup>[8]</sup>应用垂直循环方式来减少氧化沟在运行过程中所消耗的能量和占地面积,从而优化了传统氧化沟的体形。Pang Hongtao等<sup>[9]</sup>应用挡板及气泡扩散作为增氧的设备,研究了气升式氧化沟中的污水处理效果和水流特性,研究结果得出与传统工艺相比,气升式氧化沟的氧利用率较高,能量的消耗也相对较低。夏世斌等<sup>[10]</sup>对新型立体循环一体化氧化沟工艺系统进行研究,该工艺比传统氧化沟占用更少的面积,并且有利于污泥进行自动回流。Yang Yin等<sup>[11]</sup>通过数值模拟方法,结合具体工程实例对Carrousel氧化沟的内部流场结构进行了研究,将Moving Wall模型应用于圆盘式曝气机,试验数据与模拟结果有很好的 consistency。Thakre等<sup>[12]</sup>研究了氧化沟转轮在曲线型叶片下的曝气效率及传氧系数,并对流场结构受曝气系统的影响进行研究,试验中通过改变叶片的角度、浸没深度及转轮的转速,获得了最优叶片参数的组合。Ben Alaya等<sup>[13]</sup>以尽量满足生物反应所需的氧气含量及氧化沟流场结构为前提,通过研究曝气设备的曝气方式对氧化沟运行效率的影响,得出在设计曝气方式下应将流场结构和充氧能力同时考虑,以避免沉积发生,影响氧化沟的处理效果。Lesage等<sup>[14]</sup>应用数值模拟的方法对氧化沟内活性污泥的1号模型进行了研究,结合动量及质量守恒方程求解了氧化沟中的流体力学参数、生物活性及氧传输能力,研究表明,氧化沟中的氧气浓度分布受到氧传输能力及液体速度的影响。Stamou<sup>[15]</sup>应用数值模拟的方法,将活性污泥模型和明渠一维对流的扩散方程用于氧化沟研究,并且对氧化沟内所发生的硝化、反硝化及碳的氧化过程进行了预测。

本研究中自由水面应用VOF法捕捉,时均方程的封闭采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对氧化沟内的气液两相流进行数值模拟研究,通过对氧化沟内各测线上流速沿水深方向的分析比较,对氧化沟的优化设计和高效运行提供参考。

## 2 数学模型

### 2.1 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型

标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型是由实验所总结出的半经验性公式,主要参数为紊动动能 $k$ 和紊动能耗散率 $\varepsilon$ ,由于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型具有合理的经济性、稳定性和计算精度,在目前工程流场模拟的各种计算中得到了广泛的应用<sup>[16-17]</sup>。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $t$ 为时间; $u_i$ 为沿 $i$ ( $i$ 为笛氏坐标 $x, y$ 或 $z$ )方向的速度分量; $x_i$ 为沿 $i$ 方向的空间坐标分量。

雷诺方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j'}) + \rho g_i & \quad (2) \\ - \rho \overline{u_i u_j'} = & \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

紊流动能 $k$ 和紊动能耗散率 $\varepsilon$ 是两个基本未知量,方程分别为:

$k$ 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M & \quad (4) \end{aligned}$$

$\varepsilon$ 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} & \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $u_i, u_j$ 分别为 $i, j$ 方向的时均速度分量; $x_i, x_j$ 分别是沿 $i, j$ 方向的坐标分量; $p$ 为压强; $\mu$ 为分子黏性系数; $u_i', u_j'$ 分别为 $i, j$ 方向的脉动速度; $g_i$ 为 $i$ 方向的重力加速度, $\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $\mu_t$ 为湍动黏度; $k$ 为湍动动能; $\varepsilon$ 为紊动动能耗散率; $\delta_{ij}$ 是Kronecker

函数:  $\delta_{ij} = 1, (i = j); \delta_{ij} = 0 (i \neq j)$ 。经验常数  $C_{\mu} = 0.99$ ;  $G_k$  是因平均梯度影响湍动能  $k$  的产生项;  $G_b$  为浮力作用引起的湍动能产生项,  $Y_M$  为可压缩的湍流脉动因膨胀而产生的对总耗散率的影响。  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$  为经验常数, 分别为 1.44, 1.92 和 0.09,  $\sigma_k = 1.0$  和  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ , 分别为与湍动能和耗散率对应的 Prandtl 数。

## 2.2 模拟自由水面的 VOF 法

用 VOF 方法<sup>[18-19]</sup>研究网格单元中的网格体积比函数  $F_w = (t, x_i)$  和流体, 以此确定自由液面 ( $i = 1, 2, 3$ ) 来追踪流体的变化, 但并没有对自由液面上的质点运动进行追踪:  $F_w(x_i, t) = 1$ , 则表示液体充满该单元; 当  $F_w(x_i, t) = 0$ , 则表示该单元为空; 若  $F_w(x_i, t) \in (0, 1)$ , 则表示该单元部分充满液体。

描述  $F_w$  的控制方程为:

$$\frac{\partial F_w}{\partial t} + \frac{\partial (u_i F_w)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

引入 VOF 后,  $\rho, \mu$  是  $F_w(t, x_i)$  的函数, 其表示式为:

$$\rho = F_w \rho_w + (1 - F_w) \rho_a \quad (7)$$

$$\mu = F_w \mu_w + (1 - F_w) \mu_a \quad (8)$$

式中:  $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别为水和空气的密度;  $\mu_w$  和  $\mu_a$  分别为水和空气的分子黏性系数。

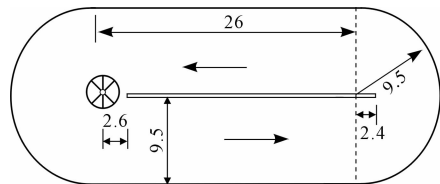


图1 氧化沟平面尺寸图(单位:m)

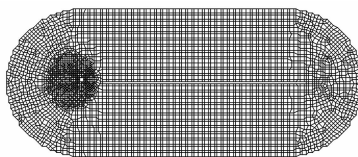


图2 计算区域平面网格图

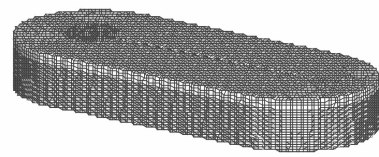


图3 计算区域三维网格图

## 3.2 初始条件及边界条件

在本文的计算中, 采用标准  $k - \varepsilon$  模型为基本紊流模型, VOF 法用来捕捉自由液面, 将多参考系法用于叶轮区域的计算。将计算区域的顶面设为压力出口边界, 设其相对压强等于 0, 在各壁面处应用标准壁面函数。氧化沟中的水深在初始时刻设定为 4.24 m。总计算时间 120 s, 时间步长 0.005 s, 所有的残差收敛标准均为  $10^{-4}$ 。

## 4 结果分析与讨论

对氧化沟内的流场结构验证分析, 测量了离转轮区域较远处的 4 个断面上不同测线沿水深流速分布的情况: 位置 1 ( $x = 3.4$  m)、位置 2 ( $x = 16$  m)、位置 3 ( $x = 16$  m)、位置 4 ( $x = 4$  m) 平面位置如图

将上述方程(6)、(7)和(8)与紊流数学模型基本方程(1)至(5)根据实际工况施加相应的边界条件后, 便可求出相应的各未知变量, 如紊动动能、压力、紊动耗散率、水体体积率函数和流速等的分布。

## 3 数值模拟

### 3.1 计算区域与网格划分

在本研究中以安徽国祯环保节能科技股份有限公司设备制造厂中的一个氧化沟为模型对其进行讨论分析。文中的工作介质为清水, 氧化沟内的有效水深为 4.24 m, 单沟道宽度为 9.5 m, 水流沿中心线流动的水平距离为 111 m。氧化沟内的水体总体积为 3 300 m<sup>3</sup>。氧化沟的平面尺寸如图 1 所示。推流转轮采用六叶片形式, 每个叶片的高度为 0.974 m, 长为 1.132 m。安装推流转轮时氧化沟的自由液面与设计水深线相平。转轮的安装方式为偏心安置, 中心挡墙的末端与转轮中心轴的距离为 0.4 m。在本文的实验中, 推流转轮的叶片为逆时针方向转动, 转速为 29.01 rpm。

在本文的数值模型中为提高网格划分的质量, 转轮叶片厚度按 0 处理。图 2、3 为氧化沟内网格的划分图。对自由液面附近及池底网格在沿深度方向上适当进行加密, 网格总数为 284 200。

4 所示, 模型中以池底中心作为坐标原点。测线 Line 1 分布在各测量截面靠近外墙位置处、测线 Line 2 分布在沟道中间的断面位置处、测线 Line 3 分布在靠近内墙位置处。测线 Line 1、3 距外、内墙分别为 0.5 m。

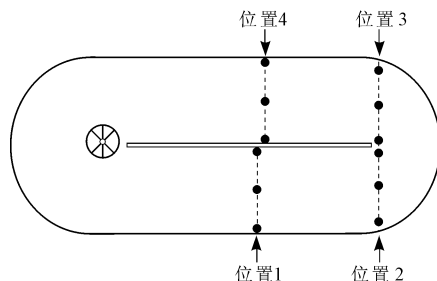


图4 垂线流速测线布置图

如图5所示为各测线流速的实验数据与模拟结果比较,由图5(a)~5(l)可以得出实验数据与模拟结果吻合良好。由此说明,在推流转轮的推动下,在

氧化沟内远离转轮区域的位置,所选用的紊流数学模型可以较好地模拟该区域的内部流场结构。

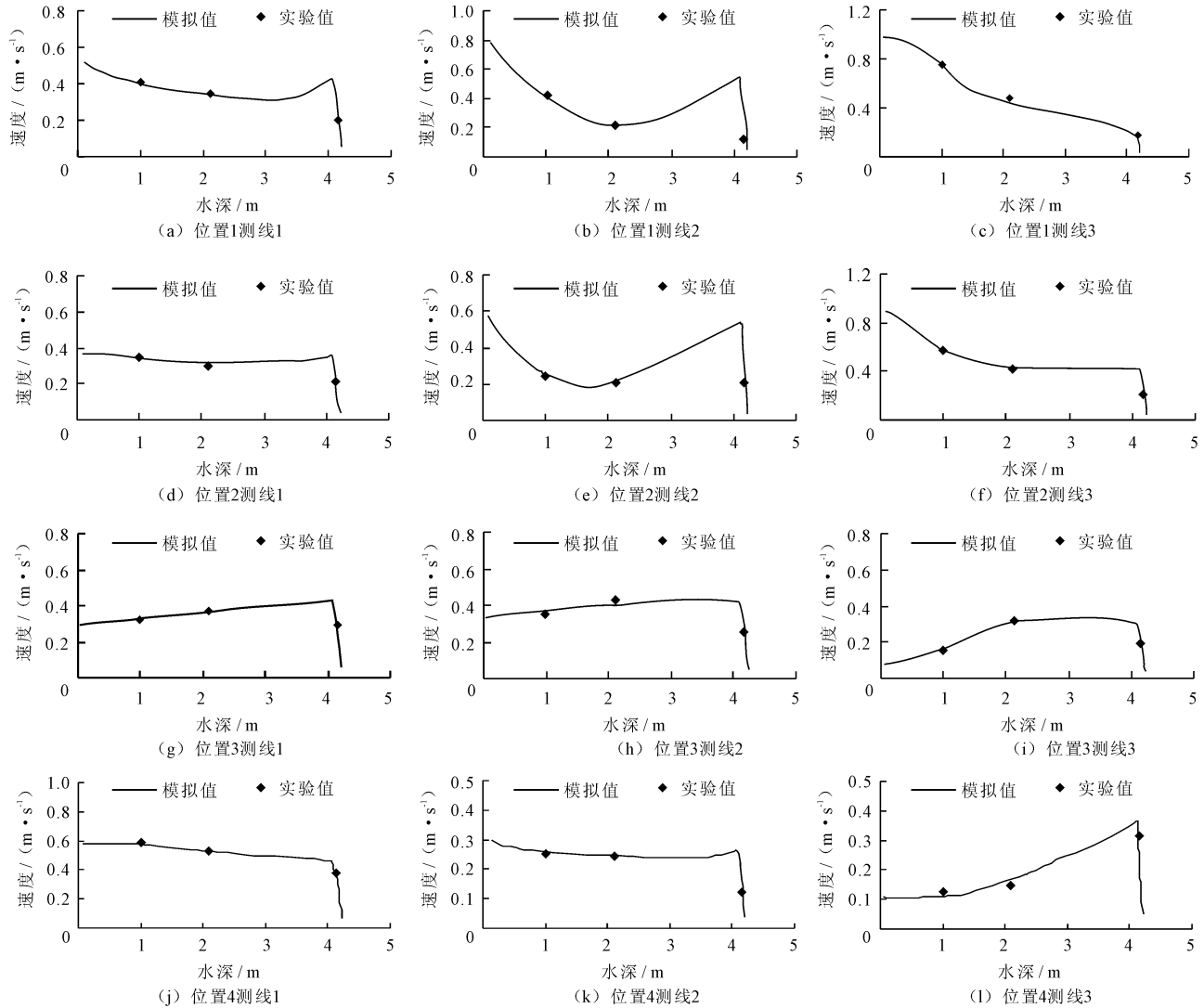


图5 流速沿水深分布比较图

## 5 结论

本文主要模拟了氧化沟内的流速分布和流场结构,验证了所选用的数值模型的正确性,把不同断面不同测线上沿水深流速分布情况的模拟结果与相应试验数据进行了对比分析,实验数据与所模拟的结果吻合良好。表明所选用的紊流数学模型和所采用的数值求解方法能够较好地模拟氧化沟内部的流场结构和流速分布规律。

通过对氧化沟内各测线上流速沿水深方向的分析比较,对氧化沟的优化设计和高效运行提供参考。

## 参考文献:

- [1] Diamantis V, Pappaspyrou I, Melodios P, et al. High aeration rate enhances flow stratification in full-scale oxidation ditch[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2010, 33(2): 293-298.
- [2] 范 茏, 陈大方, 刘艳臣, 等. Carrousel 氧化沟单个表曝机流态的模型试验和分析比较[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(4): 97-101.
- [3] 许丹宇, 张代钧, 陈 钊, 等. 卡鲁塞尔氧化沟反应器三维流场体视 PIV 测量[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(3): 387-391.
- [4] Argaman Y, Spivak E. Engineering aspects of wastewater treatment in aerated ring-shaped channels[J]. *Wat Res*,

- 1997,4(8):317-322.
- [5] Hao Xiaodi, Doddema H J, van Groenestijn J W V. Conditions and mechanisms affecting simultaneous nitrification and denitrification in a Pasveer oxidation ditch[J]. *Bioresource Technology*, 1997,59(2-3):207-215.
- [6] Ushikubo A, Yoshimura M, Kato M, et al. Livestock waste treatment in a double channel oxidation ditch[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1991,36(1):59-74.
- [7] 羊寿生,王锡清. 三沟式氧化沟设计与计算[J]. *建筑技术通讯(给水排水)*,1991(4):18-21.
- [8] Xia Shibin, Liu Junxin. An innovative integrated oxidation ditch with vertical circle for domestic wastewater treatment [J]. *Process Biochemistry*, 2004,39(9):1111-1117.
- [9] Pang Hongtao, Shi Hanchang, Shi Huiming. Flow characteristic and wastewater treatment performance of a pilot-scale airlift oxidation ditch[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2009,3(4):470-476.
- [10] 夏世斌,刘俊新. 立体循环一体化氧化沟处理城市污水研究[J]. *中国给水排水*,2002,18(6):1-4.
- [11] Yang Yin, Wu Yingying, Yang Xiao, et al. Flow field prediction in full-scale Carrousel oxidation ditch by using computational fluid dynamics [J]. *Water Science and Technology*, 2010,62(2):256-265.
- [12] Thakre S B, Bhuyar L B, Deshmukh S J. Oxidation ditch process using curved blade rotor as aerator[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2009,6(1):113-122.
- [13] Alaya S B, Haouech L, Cherif H, et al. Aeration management in an oxidation ditch [J]. *Desalination*, 2010,252(1-3):172-178.
- [14] Lesage N, Spérandio M, Lafforgue C, et al. Calibration and application of a 1-D model for oxidation ditches[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2003,81(9):1259-1264.
- [15] Stamou A I. Modelling of oxidation ditches using an open channel flow 1-D advection-dispersion equation and ASM1 process description [J]. *Water Science and Technology*, 1997,36(5):269-276.
- [16] 周俊波,刘洋,等. FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [17] 魏文礼,戴会超. 紊流模型理论及工程应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2006.
- [18] Shen Y M, Ng C O, Zheng Y H. Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation k-e turbulence modeling [J]. *Ocean Engineering*, 2004(31):87-95.
- [19] 李 锐. 倒伞曝气机驱动氧化沟的计算流体力学模拟[D]. 北京:中国科学技术大学,2011.

(上接第142页)

实现新疆长治久安具有重要的战略意义。从怒江调水入疆是一项规模宏大的工程,未来还需要做进一步的深入研究工作。

### 参考文献:

- [1] 杨力行,郑祖国,姜卉芳. 南水西调初步设想——兼论水资源的高效利用和合理调配[J]. *八一农学院学报*, 1995,18(1):36-41.
- [2] 侍克斌,岳春芳,何春梅. 西部南水西调前期研究—疆外跨流域调水可行性初探[J]. *新疆农业大学学报*, 2012,35(1):1-6.
- [3] 新疆维吾尔自治区水利厅,新疆水文水资源局. 新疆水资源公报[R]. 乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区水利厅,2013.
- [4] 塔义尔·肉孜,塔世根·加帕尔. 新疆水资源与生态环境建设[J]. *水土保持研究*,2002,9(1):22-25.
- [5] 管 瑶,何仲林,张 斌. 新疆水资源开发利用现状合理性分析[J]. *水土保持通报*,2006,26(2):104-106.
- [6] 新疆维吾尔自治区水利厅. 新疆水文水资源局. 新疆水资源公报[R]. 乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区水利厅,2004-2013.
- [7] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2004-2013.
- [8] 陈芳淼. 新疆荒漠化基本现状与防治战略[C]//. 第三届国际防治荒漠化科学技术大会论文集,北京,2014:1-9.
- [9] 李 虎,高亚琪,王晓峰,等. 新疆土地荒漠化监测分析[J]. *地理学报*,2004,59(2):197-202.
- [10] 王 浩. 新疆及伊犁河谷水资源开发利用若干问题的思考:专题报告[R]. 北京:中国水科院,2006.
- [11] 新疆水文水资源局. 新疆水资源年报2007~2009[R]. 乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区水利厅,2007-2009.
- [12] 何建新,侯 杰,杨力行. 再论南水西调的战略背景及可行性[J]. *水资源与水工程学报*,2011,22(1):108-110.
- [13] 杨力行. 新疆可持续大开发中水利建设的战略设想[J]. *新疆社会经济*,2000,56(2):9-13.
- [14] 沈凤生,淡英武. 南水北调西线工程规划纲要[J]. *人民黄河*,2001,23(10):4-6.
- [15] 刘冬英,沈燕丹,王政祥. 怒江流域水资源特性分析[J]. *人民长江*,2008,39(17):64-66.