

水力插板透水丁坝坝头冲刷坑深度模型试验

张 凯,侍克斌,李玉建,吴福飞,王 欣,任 志

(新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探索水力插板透水丁坝减小坝头冲刷坑深度的最佳设计参数和布置方案,通过改变流量、丁坝挑角、丁坝透水率、丁坝长度进行单因素影响试验,得出坝头冲刷坑深度与各单因素的回归方程。从每组单因素试验结果中选择最佳试验水平,利用 $L_9(3^4)$ 正交试验设计表设计4因素3水平的正交试验。试验结果表明:4个单因素对水力插板透水丁坝坝头冲刷坑深度的影响从大到小依次为:丁坝透水率、流量、丁坝长度、丁坝挑角;在一定流量条件下,水力插板透水丁坝最佳布置方案的设计参数为丁坝透水率30%、丁坝长度30 cm、丁坝挑角 60° 。

关键词:水力插板;透水丁坝;冲刷坑深度;流量;挑角;透水率;正交试验

中图分类号:TV83 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0090-05

Model test of scour depth at jetty head of hydraulic flashboard permeable spur dike//ZHANG Kai, SHI Kebin, LI Yujian, WU Fufei, WANG Xin, REN Zhi(*College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China*)

Abstract: In order to explore the optimal design parameter and layout scheme of a hydraulic flashboard permeable spur dike with the minimum scour depth at the jetty head, single factor experiments were carried out by changing the discharge, the jet angle, the water permeable rate, and the length of the spur dike. The regression equations between each single factor and the scour depth at the jetty head were obtained. The best test level in each group of single factor test results was chosen and an orthogonal experiment with four factors and three levels was designed using the $L_9(3^4)$ orthogonal experiment design table. The experimental results show that the four single factors influence the scour depth at the jetty head of the hydraulic flashboard permeable spur dike in the following descending order: the water permeable rate of the spur dike, the discharge, the length of the spur dike, and the jet angle of the spur dike. With a certain discharge, the design parameters of the optimal layout scheme of a hydraulic flashboard permeable spur dike are as follows: the water permeable rate of the spur dike is 30%, the length of the spur dike is 30 cm, and the jet angle of the spur dike is 60° .

Key words: hydraulic flashboard; permeable spur dike; scour at jetty head; discharge; jet angle; water permeable rate; orthogonal test

水力插板技术由胜利油田管理局何富荣等^[1]于1992年提出,最先应用于滨海油田的堤防工程,效果十分显著。由于水力插板技术具有预置化程度高,工程造价低,施工周期短等优点,经过20多年的发展,水力插板技术在桥梁基础工程^[2]、河道整治工程^[3]、海港工程^[4]等多领域得到广泛应用。作为河道整治工程中的水工建筑物,透水丁坝有着悠久的历史,其中以井柱桩为代表的透水丁坝在我国应用广泛^[5-8]。有学者将透水丁坝与水力插板技术相结合,提出水力插板透水丁坝这一新型水工建筑物。刘国起等^[9]对水力插板透水丁坝周围水流进行数

值模拟,发现水力插板透水丁坝防护堤岸效果显著。周庆庆等^[10]通过动床模型试验对新疆粉细沙河流上的水力插板透水丁坝缓流促淤的效果进行研究,发现水力插板透水丁坝缓流促淤效果比井柱桩透水丁坝和实体丁坝显著。任何丁坝都无法避免局部冲刷和沿程冲刷,坝头局部冲刷严重威胁丁坝的稳定性和安全性^[11],但还没有学者对水力插板透水丁坝坝头冲刷坑深度进行深入研究。笔者通过单因素控制变量法进行动床模型试验,探索流量、丁坝挑角、丁坝透水率、丁坝长度与坝头冲刷坑深度的关系;从单因素试验结果中选择最佳试验水平进行正交试

基金项目:国家自然科学基金(51469032);新疆高校科研计划(XJEDU2013H12)

作者简介:张凯(1990—),男,硕士研究生,主要从事水利水电工程研究。E-mail:1690647@qq.com

通讯作者:侍克斌(1957—),男,教授,主要从事水利工程学科方面的教学与科研。E-mail:xndsg@sina.com

验,寻找水力插板透水丁坝减小坝头冲刷坑深度的最佳布置方案的设计参数,以期为实际工程中水力插板透水丁坝的工程设计及应用提供参考。

1 单因素试验

1.1 试验概况

位于塔里木河干流的其满水库3号引水口河段上的井柱桩透水丁坝坝头冲刷十分严重,严重影响丁坝的稳定性和安全性,尤其是洪水来临之际,洪水会把许多井柱桩冲倒,因此选取该河段为试验的原型。塔里木河治理的主要目的是保护生态环境,防洪是次要目的,所以洪水设计标准不高^[12],通过查阅相关资料^[13],选取该河段20年一遇洪水流量1337 m³/s为试验流量的上限。综合考虑各种因素并结合自身试验条件,采用正态相似模型,参照模型设计理论和重力相似准则确定各比尺如下:各方向上的几何比尺 $\lambda_x=\lambda_y=\lambda_z=\lambda_l,\lambda_l=93$;流速比尺 $\lambda_v=\lambda_l^{0.5}=9.64$;流量比尺 $\lambda_Q=\lambda_v\lambda_l^2=\lambda_l^{2.5}=83\,408$;水流运动时间比尺 $\lambda_t=\lambda_l^{0.5}=9.64$ 。根据模型比尺换算的试验流量的上限为16.03 L/s。

模型试验是在长10 m,宽1.2 m,高0.4 m,底坡*i*=1/4 000的砖砌式混凝土水槽中进行。水槽进水口设置有消能栏栅进行消能,在离进水口6 m处放置水力插板透水丁坝进行试验,水力插板整体轮廓见图1,试验的平面布置图见图2,丁坝所在水槽横断面布置见图3。

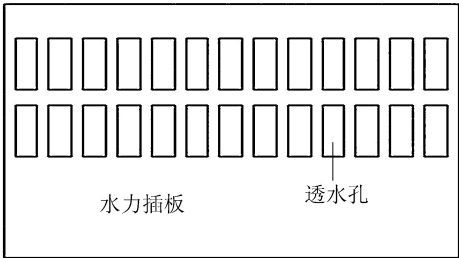


图1 水力插板透水丁坝整体轮廓

该河段的床沙粒径为0.050~0.086 mm^[14]。综合考虑模型沙起动流速、沉速等因素,选用新疆新华天粉煤灰技术开发有限公司的中值粒径为0.06 mm

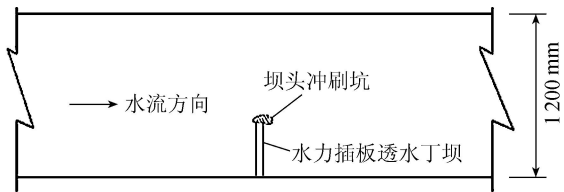


图2 试验平面布置

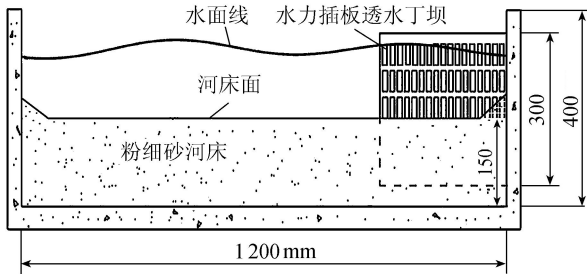


图3 水力插板所在水槽横断面布置(单位:mm)

的F类粗粉煤灰作为模型沙,并按厚度15 cm均匀平铺在水槽底部。为了更好地反映冲刷特性,采用清水进行试验。Garde等^[15]的试验研究表明,经过3~5 h,丁坝坝头的局部冲刷趋于稳定且坝头冲刷坑深度达到最大值,因此,结合自身试验条件,在保证试验冲刷效果明显的前提下,设定放水时间为3 h。

1.2 试验分组

分别改变流量、丁坝挑角、丁坝透水率、丁坝长度进行4组单因素试验,单因素试验分组情况如表1所示。采用测针测量坝头冲刷坑的深度。每次试验结束后,填平坝头冲刷坑,恢复河床平整。

1.3 试验结果分析

1.3.1 流量对坝头冲刷坑深度的影响

坝头冲刷坑深度与流量的关系如图4所示,坝头

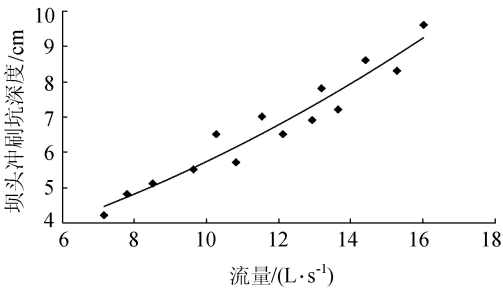


图4 坝头冲刷坑深度与流量的关系

表1 单因素试验分组

影响因素	流量/(L·s ⁻¹)	丁坝挑角/(°)	丁坝透水率/%	丁坝长度/cm
流量	7.17, 7.81, 8.52, 9.65, 10.28, 10.83, 11.55, 12.13, 12.94, 13.2, 13.66, 14.42, 15.29, 16.03	90	30	40
丁坝挑角	16.03	30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150	30	40
丁坝透水率	16.03	90	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80	40
丁坝长度	16.03	90	30	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

冲刷坑深度 Y 与流量 Q 的回归方程为 $Y=0.01536Q^2+0.18424Q+2.338$, 相关系数 $R^2=0.93318$ 。

1.3.2 丁坝挑角对坝头冲刷坑深度的影响

坝头冲刷坑深度与丁坝挑角的关系如图 5 所示, 坝头冲刷坑深度与丁坝挑角 θ 的回归方程为 $Y=-0.00067\theta^2+0.12543\theta+2.72$, $R^2=0.84601$ 。

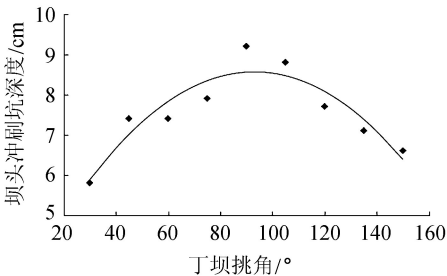


图 5 坝头冲刷坑深度与丁坝挑角的关系

1.3.3 丁坝透水率对坝头冲刷坑深度的影响

坝头冲刷坑深度与丁坝透水率的关系如图 6 所示, 坝头冲刷坑深度与丁坝透水率 c 的回归方程为 $Y=-0.07767c+8.562$, $R^2=0.94988$ 。

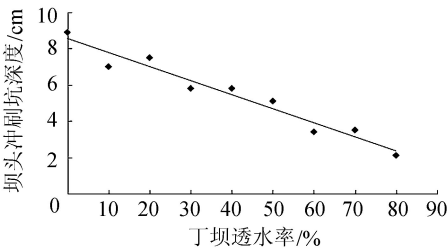


图 6 坝头冲刷坑深度与丁坝透水率的关系

1.3.4 丁坝长度对坝头冲刷坑深度的影响

坝头冲刷坑深度与丁坝长度的关系如图 7 所示, 坝头冲刷坑深度与丁坝长度 l 的回归方程为 $Y=0.09767l+4.448$, $R^2=0.91510$ 。

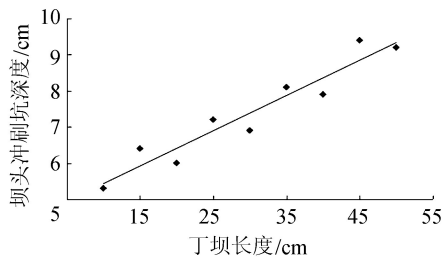


图 7 坝头冲刷坑深度与丁坝长度的关系

2 正交试验

2.1 正交试验表的选择

根据单因素试验的结果, 选取各因素中最佳试验水平设计正交试验, 对结果进行极差分析, 以确定最佳水力插板透水丁坝设计参数及布置方案。试验选择 $L_9(3^4)$ 正交表, 即选择流量、丁坝挑角、丁坝透水率、丁坝长度 4 个因素, 每个因素选取 3 个水平。

2.2 最佳试验水平的选择

2.2.1 流量水平的选择

由图 4 可知, 流量越大, 坝头冲刷坑深度越大, 越不利于水力插板透水丁坝的稳定, 因此选择流量 16.03 L/s、15.29 L/s 和 14.42 L/s 作为流量的 3 个水平进行试验。由图 4 中这 3 个点的关系看, 这样的选择符合用优选法从单因素试验中选择最佳试验水平的基本要求^[16-18]。

2.2.2 丁坝挑角水平的选择

下挑布置丁坝和上挑布置丁坝对主槽水流流线的影 响没有正挑布置丁坝大。陈效国等^[19] 提出丁坝布置应该采取下挑式、小挑角布置, 这样能更加顺应水流的流动方向。但挑角不应该过小, 因为在相同坝长的情况下, 挑角越小, 丁坝的有效坝长越小, 丁坝护岸的范围也就越小, 护岸效果越不明显。图 5 中丁坝挑角为 45°、60°、75°的 3 个点的关系符合用优选法从单因素试验中选择最佳试验水平的基本要求, 确定选择丁坝挑角 45°、60°、75°作为正交试验的 3 个水平。

2.2.3 丁坝透水率水平的选择

丁坝的透水率越小, 丁坝对水的阻挡作用越明显, 坝头水流的扰动作用就更加强烈, 坝头冲刷坑深度也会变大。丁坝透水率过大会减弱丁坝对堤岸的保护作用, 缓流促淤的效果也不显著。周银军等^[20] 提出井柱桩透水丁坝合理的透水率为 20% ~ 40%, 因此选择丁坝透水率水平分别为 20%、30%、40%。由图 6 可知这样的选择符合用优选法从单因素试验中选择最佳试验水平的基本要求。

2.2.4 丁坝长度水平的选择

刘燕等^[21] 认为丁坝在垂直于水流方向的投影长度与河宽之比大于 0.33 是长丁坝, 小于 0.33 是短丁坝。长丁坝的作用除了护岸之外, 主要的作用在于挑流, 改变主槽水流的方向^[22]。短丁坝对于主槽水流方向的改变没有长丁坝显著, 主要是改变局部水流方向, 但护岸效果比长丁坝好。结合其满水库引水河道的实际情况和防护目的, 决定选用短丁坝进行研究。选择长度水平分别为 25 cm、30 cm、35 cm 的丁坝, 丁坝在垂直于水流方向的投影长度与水槽宽度之比分别为 0.21、0.25、0.29。由图 7 可知这样的选择符合用优选法从单因素试验中选择最佳试验水平的基本要求。

2.3 正交试验因素水平表概况

综上所述, 得坝头冲刷坑深度 $L_9(3^4)$ 正交试验因素水平表如表 2 所示(表中因素 A、B、C、D 分别为流量、丁坝挑角、丁坝透水率、丁坝长度)。

表2 坝头冲刷坑深度 $L_0(3^4)$ 正交试验因素水平				
水平	因素 A/ ($L \cdot s^{-1}$)	因素 B/(°)	因素 C/%	因素 D/cm
1	14.42	45	20	25
2	15.29	60	30	30
3	16.03	75	40	35

2.4 正交试验结果

2.4.1 正交试验设计及结果

坝头冲刷坑深度 $L_0(3^4)$ 正交试验设计及结果如表3所示。由表3可知,各因素的极差由大到小依次为: C、A、D、B,4个因素对水力插板透水丁坝坝头冲刷坑深度的影响从大到小依次为:丁坝透水率、流量、丁坝长度、丁坝挑角。4个影响因素中,丁坝透水率对坝头冲刷坑深度的影响最为明显。

表3 坝头冲刷坑深度 $L_0(3^4)$ 正交试验设计及结果

试验号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	坝头冲刷坑深度/cm
1	1	1	1	1	8.9
2	1	2	2	2	6.2
3	1	3	3	3	9.4
4	2	1	2	3	6.6
5	2	2	3	1	6.8
6	2	3	1	2	7.2
7	3	1	3	2	8.0
8	3	2	1	3	8.5
9	3	3	2	1	7.4

2.4.2 验证试验

按方案为 $A_2B_2C_2D_2$ 进行3次平行试验,坝头冲刷坑深度的平均值为5.4cm,均低于表3中每一项的试验结果,所以使坝头冲刷坑深度最小的方案是为 $A_2B_2C_2D_2$ 。但实际工程中,河流流量无法人为控制,只能在一定流量下合理地设计和布置丁坝使坝头冲刷坑深度最小。因此在一定流量下,水力插板透水丁坝减小坝头冲刷坑深度的最佳布置方案的设计参数为:丁坝透水率30%、丁坝长度30cm、丁坝挑角60°。

3 结 论

a. 在布置单个水力插板透水丁坝的条件下,坝头冲刷坑深度与流量的回归方程为 $Y=0.01536Q^2+0.18424Q+2.338$,坝头冲刷坑深度与丁坝挑角的回归方程为 $Y=-0.00067\theta^2+0.12543\theta+2.72$,坝头冲刷坑深度与丁坝透水率的回归方程为 $Y=-0.07767c+8.562$,坝头冲刷坑深度与丁坝长度的回归方程为 $Y=0.09767l+4.448$ 。

b. 水力插板透水丁坝坝头冲刷坑深度的4个影响因素中,影响强度从大到小依次为:丁坝透水率、流量、丁坝长度、丁坝挑角。在一定流量条件下,水力插板透水丁坝减小坝头冲刷坑深度的最佳布置

方案的设计参数为:丁坝透水率30%、丁坝长度30cm、丁坝挑角60°。

参考文献:

[1] 何富荣,程义吉,许国辉. 水力插板桩成套技术研究与应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010.

[2] 宋智贤,温建祥,孟繁森,等. 水力插板桩在桥涵基础中的应用[J]. 世界桥梁,2002(4):26-29. (SONG Zhixian, WEN Jianxiang, MENG Fansen, et al. The application of the hydraulic thrust sheet pile in bridge foundation[J]. World Bridges, 2002(4):26-29. (in Chinese))

[3] 程义吉. 水力插板在黄河口河道整治中的应用[J]. 人民黄河,2010,32(10):22-23. (CHENG Yijie. The regular application of the hydraulic thrust sheet pile in Yellow River[J]. Yellow River, 2010,32(10):22-23. (in Chinese))

[4] 刘爱霞,何富荣. 水力插板在海港工程中的应用[J]. 海岸工程,2010,29(3):74-78. (LIU Aixia, HE Furong. The application of the hydraulic thrust sheet pile in harbour engineering[J]. Coastal Engineering, 2010,29(3):74-78. (in Chinese))

[5] 李玉建,侍克斌,周峰. 游荡型河道透水整治建筑物研究综述[J]. 人民黄河,2002,24(11):15-17. (LI Yujian, SHI Kebin, ZHOU Feng. The review of permeable regulation structures about wandering river[J]. Yellow River, 2002,24(11):15-17. (in Chinese))

[6] TRAMPENAU T, GÖRICKE F, RAUDKIVI A J. Permeable pile groins[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 1996,122(6):267-272.

[7] 张俊华,许雨新,张红武,等. 河道整治及堤防管理[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998:104-111.

[8] 赵渭军,严盛,宣伟丽,等. 涌潮河口桩式丁坝的护滩保塘效果分析[J]. 水利学报,2006,37(6):699-703. (ZHAO Weijun, YAN Sheng, XUAN Weili, et al. Effect of sheet-pile groins on protecting dykes and flats in tidal bore estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(6):699-703. (in Chinese))

[9] 刘国起,李玉建,侍克斌,等. 水力插板透水丁坝在新疆多沙河流上优越性的初步研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):122-126. (LIU Guoqi, LI Yujian, SHI Kebin, et al. Probe on superiority of hydraulic flashboard permeable spur dike in multi-sediment river of Xinjiang[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014,25(1):122-126. (in Chinese))

[10] 周庆庆,李玉建,孙启冀,等. 水力插板透水丁坝缓流促淤效果试验研究[J]. 人民黄河,2015,37(9):54-58. (ZHOU Qinqin, LI Yujian, SUN Qiji, et al. Experimental study on effect of sedimentation promotion with tranquil flow of hydraulic flashboard permeable spur dike[J]. Yellow River, 2015,37(9):54-58. (in Chinese))

- [11] 王先登,彭冬修,夏炜. 丁坝坝体局部水流结构与水毁机理分析[J]. 中国水运,2009,9(9):189-191. (WANG Xiandeng, PENG Dongxiu, XIA Wei. The structure and waterlogging mechanism analysis of spur dike local water [J]. China Water Transport, 2009, 9(9): 189-191. (in Chinese))
- [12] 胡春宏,王延贵,郭庆超,等. 塔里木河干流河道演变与整治[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [13] 李玉建,谭冬初,唐新军. 塔里木监狱齐满水库防洪加固工程初步设计报告[R]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,1998.
- [14] 李玉建,侍克斌,尚层. 塔里木河干流河型、河性分析[J]. 人民黄河,2011,33(6):17-19. (LI Yujian, SHI Kebin, SHANG Ceng. The analysis of type and character of Tarim River[J]. Yellow River, 2011, 33(6): 17-19. (in Chinese))
- [15] GARDE R J, SUBRAMANYA K S, NAMBUDRIPAD K D. Study of scour around spur-dikes [J]. Journal of Hydraulics Division, 1961, 87(6): 23-37.
- [16] 潘捷建. 单因素优选法原理[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 1975(1): 162-190. (PAN Jiejian. The theory of single factor select[J]. Journal of Central China Normal University(Natural Science), 1975(1): 162-190. (in Chinese))
- [17] 中国科学院数学研究所优选法小组. 单因素优选法:关于确定单峰函数最佳点位置的问题[J]. 数学的实践与认识, 1973, 3(2): 42-58. (The group of optimum seeking method of Chinese Academy of Sciences. Optimum seeking method of single factor: the problem of determining the best point position of unimodal function [J].
- Mathematics in Practice and Theory, 1973, 3(2): 42-58. (in Chinese))
- [18] 张吉祥,欧来良. 正交试验法优化超声提取枣核总黄酮[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 18-21. (ZHANG Jixiang, OU Lailiang. Optimization by orthogonal array design of ultrasonic extraction of total flavonoids from Chinese date seeds [J]. Food Science, 2012, 33(4): 18-21. (in Chinese))
- [19] 陈效国,李丕武,谢向文,等. 堤防工程新技术[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.
- [20] 周银军,刘焕芳,何春光,等. 透水丁坝局部冲淤规律试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2008(1): 57-60. (ZHOU Yinjun, LIU Huanfang, HE Chunguang, et al. Experimental study on local scour silting around permeable spur [J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(1): 57-60. (in Chinese))
- [21] 刘燕,江恩惠,李军华,等. 丁坝布置形式与河道整治目的的承辅关系[J]. 人民黄河, 2007, 29(4): 13-14. (LIU Yan, JIANG Enhui, LI Junhua, et al. The bearing complementary relationship of layout form and regulation of spur dike [J]. Yellow River, 2007, 29(4): 13-14. (in Chinese))
- [22] 周银军,刘焕芳,何春光,等. 桩柱透水丁坝水流特性试验研究[J]. 泥沙研究, 2009(5): 58-62. (ZHOU Yinjun, LIU Huanfang, HE Chunguang, et al. Experimental study on flow character around the pillared permeable spur dike [J]. Journal of Sediment Research, 2009(5): 58-62. (in Chinese))

(收稿日期:2015-10-18 编辑:郑孝宇)

(上接第23页)

- [7] 武国正,徐宗学,李畅游. 基于分形理论的水体富营养状况评价及其验证[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 12-16. (WU Guozheng, XU Zongxue, LI Changyou. Water eutrophication assessment and validation based on fractal theory [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 12-16. (in Chinese))
- [8] OSBORNE A R, KIRWAN A D, PROVENZALE A, et al. Fractal drifter trajectories in the Kuroshio extension [J]. Tellus, 2010, 41A(5): 416-435.
- [9] QU B, ADDISON P S. Modelling flow trajectories using fractional Brownian motion [EB/OL]. (2015-10-24) <https://www.computer.org/web/csdl/index/-/csdl/proceedings/iwcfta/2010/4247/00/4247a420-abs.html>
- [10] LI M. On the long-range dependence of fractional Brownian motion, mathematical problems in engineering [M]. New York: Hindawi Publishing Corporation, 2013.
- [11] QU B, ADDISON P S. Development of FBMINC model for particle diffusion in fluids [J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(4): 439-454.
- [12] 瞿波,保尔·爱迪生. 流体中污染物扩散的分形模拟[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 9-12. (QU B, ADDISON P S. Simulation of fractal pollutant dispersion in fluids [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 9-12. (in Chinese))
- [13] SANDERSON B G, PAL B K. Patch diffusion computed from Lagrangian data, with application to the Atlantic equatorial undercurrent [J]. Atmosphere-Ocean, 1990, 28(4): 444-465.
- [14] SANDERSON B G, GOULDING A. The fractal dimension of relative Lagrangian motion [J]. Tellus, 1990, 42(5). Part 6: 550-556.
- [15] SANDERSON B G, BOOTH D A. The fractal dimension of drifter trajectories and estimates of horizontal eddy-diffusivity [J]. Tellus, 1991, 43(5): 334-349.
- [16] 瞿波. 分形几何与流体 [M]. 上海: 上海社会科学院出版社, 2016.
- [17] MANDELROT B B, van NESS J W. Fractional Brownian Motions, fractal noises and Applications [J]. SIAM Review, 1968, 10(4): 422-437.
- [18] ADDISON P S. Fractals and chaos: an illustrated course [M]. London: Institute of Physics Publishing, 1997.

(收稿日期:2015-10-24 编辑:郑孝宇)