



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.01.004

刘晓轻, 练继建, 马超. 梯形输水明渠溢油运移特性数值模拟与试验研究[J]. 2016, 14(1): 25-29, 36.

LIU Xiaqing, LIAN Jijian, MA Chao. Numerical simulation and experimental investigation for oil spill transport characteristics of trapezoidal open channel in water transfer[J]. 2016, 14(1): 25-29, 36. (in Chinese)

# 梯形输水明渠溢油运移特性数值模拟与试验研究

刘晓轻, 练继建, 马超

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 面向长距离输水工程快速应对油类突发水污染事件的需求, 以梯形输水明渠为例, 采取二维水动力和溢油数值模拟以及物理模型试验相结合的手段, 开展溢油运移特性数值模拟与试验研究。研究成果表明: 由于梯形输水明渠过流宽度上的流速分布变化较大, 油污染发生后, 油膜纵向长度取决于渠道中间流速, 其变化率可表达为渠道中间流速的0.5倍; 溢油位置、风场及渠道边坡系数对油膜纵向长度影响很小。研究结果可快速预测明渠溢油污染范围, 为污染物的应急处置与调控提供技术支持。

**关键词:** 梯形输水明渠; 油膜运移; 数值模拟; 物模试验; 快速预测

中图分类号: TV14

文献标志码: A

文章编号: 1672-1683(2016)01-0025-05

## Numerical simulation and experimental investigation for oil spill transport characteristics of trapezoidal open channel in water transfer

LIU Xiaqing, LIAN Jijian, MA Chao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** For the need of rapid response to sudden oil pollution accidents in the long distance water transfer project, two-dimensional hydrodynamic and oil spill numerical simulation and experimental model were employed to investigate the transport characteristics for oil spill in the trapezoidal open channel. The results indicated that due to the large variation of velocity distribution at the horizontal cross section of the trapezoidal open channel, the longitudinal length of oil slick depends on the middle velocity of open channel after sudden oil pollution accidents, and its variation rate is 0.5 times of the middle velocity and less affected by the oil spilled location, wind, and slope coefficient. The results can predict the oil spill scope quickly and provide technical support for the emergency disposal and regulation.

**Key words:** trapezoidal open channel; oil transport; numerical simulation; experimental study; fast prediction

油污染是水域突发水污染的主要类型之一。对环境、生态、经济等产生长期的影响。国内外在海洋、河口区域的溢油研究相对较多<sup>[1-4]</sup>。近年来, 内陆河道溢油事故也逐渐引起学者的广泛关注, 并以河库典型段为主要研究对象和以矩形断面水槽为试验对象

开展了数值模拟和物理模型试验研究。数值模拟方面, 国外学者 P. D. Yapa<sup>[5]</sup>, Reinaldo Garc<sup>[6]</sup>, M. Sayed<sup>[7]</sup>等提出了适用于河道的溢油数值模拟及计算方法。国内相关学者<sup>[8-11]</sup>以黄浦江潮汐河段、长江和汉江等航运河段以及三峡水库为例, 开展了突发

收稿日期: 2015-01-06 修回日期: 2015-10-23 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1625.006.html>

基金项目: 国家重大科技专项基金资助项目(2012ZX07205005); 天津市应用基础与前沿技术研究计划自然科学基金重点项目(13JCZDJC36200); 高等学校学科创新引智计划资助(B14012)

Found: National Science and Technology Project (2012ZX07205005); Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology (13JCZDJC36200); Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B14012)

作者简介: 刘晓轻(1990-), 女, 河北石家庄人, 主要从事调水工程方面研究。E-mail: lxqtju@163.com

通讯作者: 马超(1981-), 男, 湖南株洲人, 副教授, 博士, 主要从事水库优化调度方面研究。E-mail: mac\_tju@126.com

溢油事故的溢油数值模拟研究。物模试验方面,刘栋等<sup>[12]</sup>通过潮汐水槽模拟试验,分析了油膜在潮汐水流中的扩展、漂移特征;郭运武等<sup>[13]</sup>通过风水槽试验研究了风对瞬时和连续溢油情况下油膜扩展、漂移特性的影响。Per shi QI<sup>[14]</sup>等开展了水槽试验模拟了油膜在低温河流以及冰盖下的运移过程。已开展的河道溢油数值模拟和物理模型试验研究为多类型水域溢油污染应急响应和处置奠定了基础。

梯形输水明渠因流速在横向上分布有其特殊性<sup>[15]</sup>,使得油膜扩展规律与河库典型段以及矩形断面渠道有明显的差别。同时,采用数值模拟手段获取油污染范围耗时较长,不满足输水工程突发油污染事故应急决策需求。针对此,以梯形断面输水明渠为例,开展溢油运移特性数值模拟与试验研究。研究将提出溢油运移特性及快速预测方法,以期为输水工程应对突发油类水污染事件提供技术支持。

## 1 溢油数值模拟模型

### 1.1 扩展运动

溢油进入水体后,油膜扩展面积随时间的变化采用修正的 Fay 重力-黏力公式计算<sup>[8]</sup>:

$$\frac{dA_{oil}}{dt} = K_{\alpha} A_{oil}^{1/3} \left( \frac{V_{oil}}{A_{oil}} \right)^{4/3} \quad (1)$$

式中: $A_{oil}$ 为油膜面积( $m^2$ ), $A_{oil} = \pi R_{oil}^2$ ;  $R_{oil}$ 为油膜半径( $m$ );  $K_{\alpha}$ 为系数( $s^{-1}$ )。

### 1.2 漂移运动

油粒子的漂移速度受到水流、风和自身紊动扩散作用的共同影响。计算公式为

$$V = V_m + V_i \quad (2)$$

式中: $V$ 为油粒子的速度( $m/s$ );  $V_m$ 为水流和风合成的平移速度( $m/s$ );  $V_i$ 为油粒子的紊动扩散速度( $m/s$ )。

平移速度由以下权重公式计算:

$$V_m = c_w V_w + c_s V_s \quad (3)$$

式中: $V_w$ 为风速;  $V_s$ 为水流速度;  $c_w$ 为风漂移因子,一般取 0.02 ~ 0.03;  $c_s$ 为水流漂移因子,取 1.15<sup>[10]</sup>。

油膜的紊动扩散速率采用随机步长计算。扩散速度计算公式为

$$V_i = [R] \sqrt{6D_{\alpha} / \Delta t} \quad (4)$$

式中: $[R]$ 为-1到1的随机数;  $D_{\alpha}$ 为 $\alpha$ 方向上的扩散系数。

## 2 油膜运移特性及快速预测研究

### 2.1 数值模拟研究

(1) 数值模拟工况。

模拟输水明渠的主要参数见表 1, 模拟工况见表 2。

表 1 渠道参数

Tab. 1 Channel parameters

渠道参数	长度 / km	底宽 / m	边坡系数	底坡	糙率
参数值	6	20	2.5, 1/2.5	1/20000	0.015

表 2 模拟工况

Tab. 2 Simulation conditions

工况	流量 / ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	溢油形式	溢油位置	边坡系数	溢油量 / $m^3$	风速 / ( $m \cdot s^{-1}$ )
SA1	220	瞬时	中间	2.5	5	0
SA2	100	瞬时	中间	2.5	5	0
SA3	60	瞬时	中间	2.5	5	0
SA4	40	瞬时	中间	2.5	5	0
SA5	100	瞬时	中间	2.5	5	5(顺流)
SA6	100	瞬时	中间	2.5	5	5(偏右)
SA7	100	瞬时	左岸	2.5	5	0
SA8	60	瞬时	中间	1/2.5	5	0

研究只考虑对油膜长度起主导作用的扩展、漂移过程,忽略其蒸发、溶解、乳化等过程。纵向与横向扩散系数  $D_L$  和  $D_T$  取值分别为  $0.25 m^2/s$  和  $0.1 m^2/s$ <sup>[9]</sup>。

(2) 水力结果。

水力模型计算采用非结构化三角形网格,网格最大边长为 1 m。渠道上下游设置流量边界。由水力数值模拟得到工况 SA1 至 SA4 渠道横断面上不同点的流速值,见图 1。

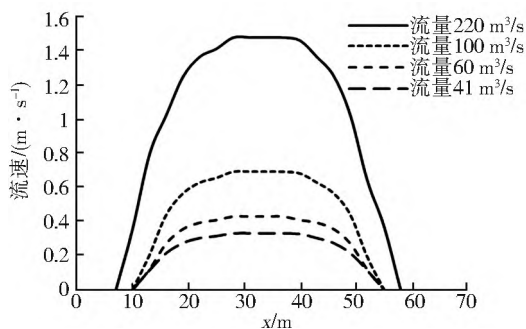


图 1 横断面流速分布

Fig. 1 Velocity distribution of the cross section

流速在横向上变化较大,呈中间大,两边小的分布特点。渠道流量为  $220 m^3/s$ 、 $100 m^3/s$ 、 $60 m^3/s$  和  $40 m^3/s$  时,渠道中间最大流速分别为  $1.428 m/s$ 、 $0.691 m/s$ 、 $0.427 m/s$  和  $0.329 m/s$ 。

(3) 油膜长度变化规律。

选取表 2 工况 SA1 至 SA4 研究油膜长度变化规律与渠道中间流速的关系。油膜在输水渠道中的扩展形态见图 2。

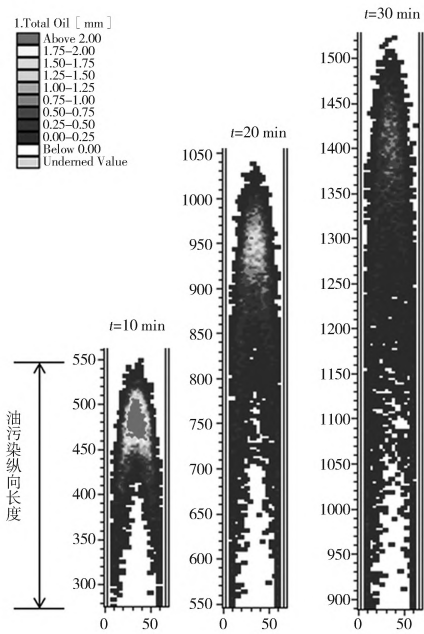


图2 油膜扩展形态

Fig. 2 Spread state of oil slick

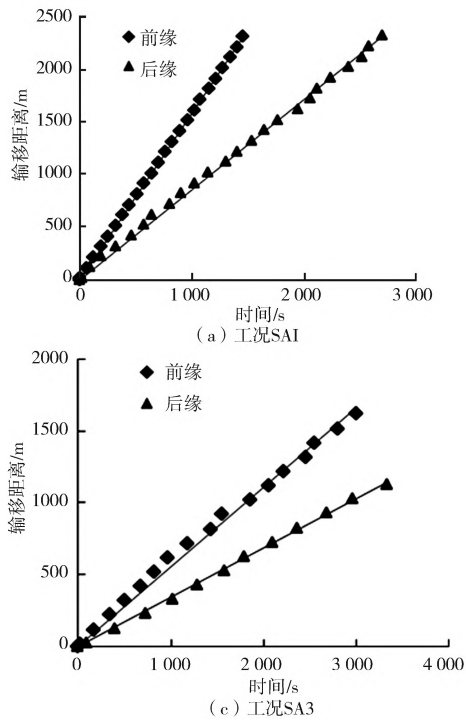


图3 不同工况下油膜前缘和后缘输移距离

Fig. 3 Transport distances of front and tailing sections under different conditions

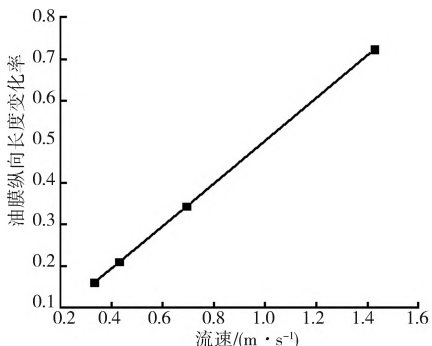


图4 油膜纵向长度变化率与渠道流速关系

Fig. 4 Relationship between variation rate of longitudinal length of oil slick and channel velocity

油膜在扩展过程中,因过流宽度上的流速差别和岸边滞留影响,油膜中间漂移速度比两侧快,油膜不断被拉长。

由数值模拟得到工况 SA1、SA2、SA3、SA4 油膜前缘和后缘输移距离与时间的关系见图 3。

将图 3 中油膜前缘和后缘输移距离与时间的关系进行线性拟合,两者之差对时间求导得到工况 SA1、SA2、SA3、SA4 条件下油膜纵向长度的变化率。

将工况 SA1 至 SA4 的油膜纵向长度变化率与渠道流速之间的关系绘于图 4 中。

由图 4 可看出,油膜纵向长度变化率与渠道中间流速成正比,通过线性拟合,得到油膜纵向长度变化率与渠道中间流速的关系式为

$$\frac{dD_{SA}}{dt} = 0.5v \tag{5}$$

式中:  $v$  为渠道中间流速(m/s)。

## 2.2 物模试验验证

为了验证溢油后油膜在渠道中的纵向长度与流速的定量关系,开展物理模型试验研究。试验水槽段模型见图 5。试验水槽段总长 28.8 m,底宽为 1 m,高度为 0.4 m,边坡系数为 2。试验设定两种流速工况: 0.027 m/s 和 0.07 m/s,试验控制水深 25 cm。两种试验工况下,在渠道中间均瞬时倒入机油 400 mL。



图 5 试验水槽  
Fig. 5 Test flume

两种流速条件下油膜长度  $D$  与时间  $t$  的关系见图 6。

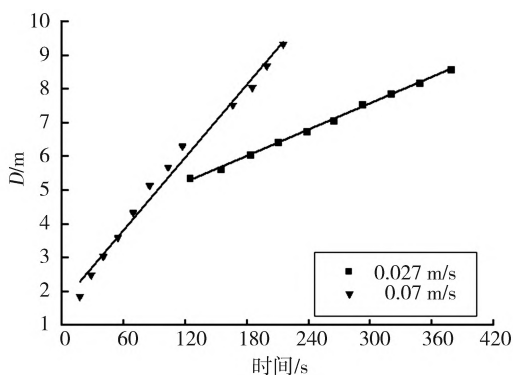


图 6 油膜长度随时间变化

Fig. 6 Variation of length of oil slick with time

将图 6 两种流速工况下的数据点进行线性拟合,并对时间求导,得到两种流速工况下的油膜长度随时间变化率为

$$\frac{dD_1}{dt} = 0.0132 \quad (6)$$

$$\frac{dD_2}{dt} = 0.0359 \quad (7)$$

比较式(6)和式(7)与相应工况下的流速可得:油膜纵向长度变化率近似为渠道中间流速的 0.5 倍。由此可知:物理模型试验与数值模拟结果相符。

### 3 影响因素分析

#### 3.1 风的影响

风场对溢油在水体中漂移的影响与水流十分相似,主要是带动油膜传输。风场与水流的重要区别是水流只带动油膜顺主流方向(一般沿河道深泓线方向)漂移,而风场则不定,可能大致沿风向将油膜带到河道的任何角落<sup>[8]</sup>。

##### (1) 风与水流同向。

为研究风对河渠油类污染物纵向长度的影响,表 2 中工况 SA5,风速设置为 5 m/s(与水流同向),通过溢油数值模拟得到工况 SA5 油膜前缘和后缘输移距离随时间变化关系见图 7。

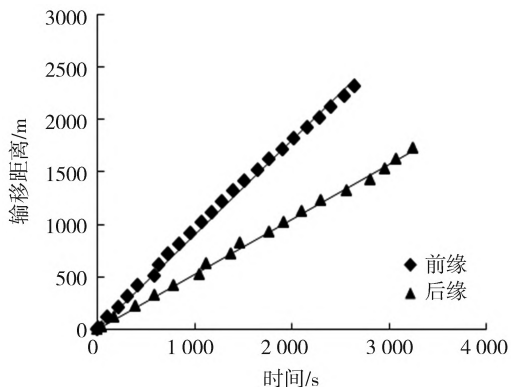


图 7 工况 SA5 油膜前缘和后缘输移距离

Fig. 7 Transport distances of front and tailing sections under condition SA5

将图 7 中油膜前缘和后缘输移距离与时间的关系进行线性拟合,两者之差对时间求导得到工况 SA5 条件下油膜的纵向长度变化率为:

$$\frac{dD_{SA5}}{dt} = 0.375 \quad (8)$$

比较工况 SA2 和工况 SA5 的油膜纵向长度随时间变化率可得,风与水流同向条件下,油膜纵向长度变化率略微增加,但增加幅度不明显。因此,风与水流同向时,风对油膜纵向长度的影响可以忽略。

文献[13]开展了风对油膜扩展漂移的实验研究,研究得到:当风与流速同向时,风速的大小对油膜的扩展尺度没有影响,即油膜扩展系数不随风速的大小而改变。数值模拟结果与前人模型实验研究相符。

##### (2) 风朝岸边。

比较工况 SA2 和 SA6 条件下油膜位置与形态见图 8。

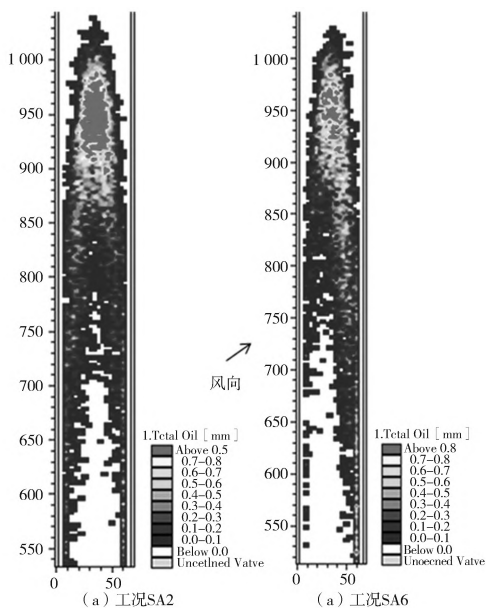


图 8  $t = 20 \text{ min}$  工况 SA2 和 SA6 油膜形态

Fig. 8 Comparison of the state of oil slick at 20 min under different conditions (a) SA2; (b) SA6

从图 8 可以看出, 工况 SA 2 和 SA 5 的油膜长度近似相同, 在风速的作用下, 油膜沿风向产生明显的偏移, 油膜聚集在右岸边。

### 3.2 溢油位置的影响

工况 SA 2 和 SA 7 条件下油膜不同时刻的扩展形态比较见图 9。

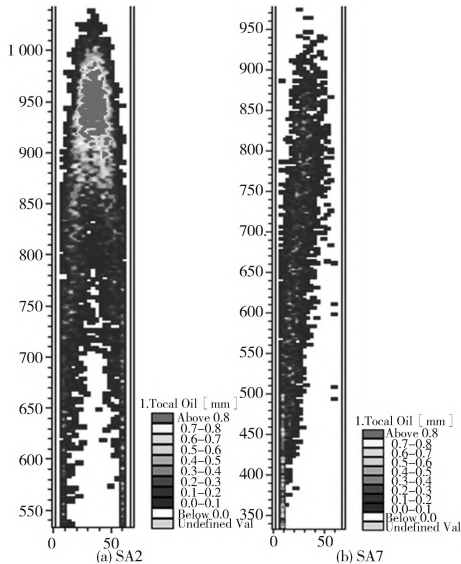


图 9 不同溢油位置下油膜扩展形态

Fig. 9 Spread state for different spill location under different conditions (a) SA2; (b) SA7

从图 9 可以看出, 在溢油初期(20 min), 岸边溢油和渠道中间溢油的油膜形态明显不同。但油膜的纵向长度基本相同。因此, 溢油位置不同对油膜纵向长度的影响可以忽略。

### 3.3 边坡系数的影响

水动力计算得到工况 SA 8 渠道中间流速为 0.701 m/s。溢油数值模拟得到的油膜前缘和后缘输移距离与时间的关系见图 10。

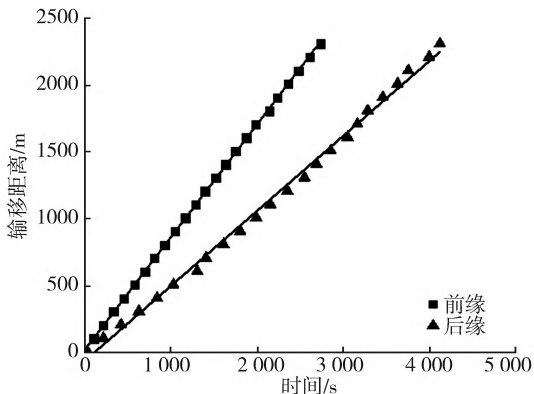


图 10 工况 SA 8 油膜前缘和后缘输移距离

Fig. 10 Transport distances of front and tailing sections under condition SA8

将图 10 中油膜前缘和后缘输移距离与时间的关系进行线性拟合, 两者之差对时间求导得到工况

SA 8 油膜的纵向长度变化率为

$$\frac{dD_{SA7}}{dt} = 0.346 \quad (9)$$

模拟得到的油膜纵向变化率约为渠道中间流速的 0.5 倍。

因此, 对于梯形断面渠道, 边坡系数的大小对油膜纵向长度变化率与渠道中间流速的关系影响较小。因此, 式(5)快速预测公式适用于不同边坡系数的梯形输水渠道。

## 4 结论

针对梯形输水明渠发生的溢油污染, 开展描述油污输水渠道中运移特征的二维数值模拟和物理模型试验研究, 得到油膜纵向长度变化率近似为渠道中间流速的 0.5 倍, 该规律受风场、溢油位置及渠道边坡系数的影响较小。以此规律可快速预测梯形输水明渠溢油的污染范围, 为突发油类水污染事件的应急调控与处置提供决策支持。

### 参考文献(References):

[1] Garc a Mart nez R., Flores-Tovar H. Computer Modeling of Oil Spill Trajectories with a High Accuracy Method [J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1999, 5(5-6): 323-330.

[2] 熊德琪, 杨建立, 严世强. 珠江口区域海上溢油应急预报信息系统的开发研究[J]. 海洋环境科学, 2005(02): 63-67. (XIONG De qi, YANG Jian li, YAN Shi qiang. R&D on oil spill contingency forecast information system for Pearl River estuary [J]. Marine Environmental Science. May. 2005(02): 63-67. (in Chinese))

[3] 张亚东, 王祥, 岳俊飞. 溢油扩展模型评述[J]. 中国水运, 2008, 8(4): 9-10. (ZHANG Ya dong, WANG Xiang, YUE Jun fei. Review in oil spill spread models [J]. China Water Transport, 2008, 8(4): 9-10. (in Chinese))

[4] 许婷. 厦门港刘五店航道海域溢油扩散数值模拟[J]. 海洋学研究, 2011, 3(29): 90-95. (XU Ting. Numerical simulation of accidental oil spill in the Liuwudian Channel, Xiamen Harbour [J]. Journal Of Marine Sciences, 2011, 3(29): 90-95. (in Chinese))

[5] P D Yapa, H T Shena, K S Angammana. Modeling Oil Spills in a River Lake System [J]. Journal of Marine Systems, 1994, 4(6): 453-471.

[6] Reinaldo Garc, Ia mart Inez, Henry florestovar. Computer modeling of oil spill trajectories with a high accuracy method [J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1999, 5(5-6): 323-330.

[7] M Sayed, M Serrer, E Mansard. Oil spill Drift and Fate Model [M]. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Oil Spill Response: A Global Perspective, 2008, 6.

[8] 姜卫星. 黄浦江溢油事故的数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (JIANG Wei xing. Study on the simulation of accidental oil spill in the Huangpu River [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

(下转第 36 页)

- [11] 李磊. 达拉特旗土地利用动态变化及驱动机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013. (LI Lei. The study on the land use change and driving force in Dalate Banner [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [12] 冯异星. 遥感与 GIS 支持下的土地利用动态变化研究—以鄂尔多斯市为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2008. (FENG Yixing. Research on the dynamic change of land use using remote sensing and GIS [D]. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2008. (in Chinese))
- [13] 康文慧, 徐进才, 张武文, 等. 内蒙古达拉特旗土地利用方式对土壤养分的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(8): 161-166. (KANG Wenhui, XU Jincan, ZHANG Wuwen, et al. Effects of land use on soil nutrient in Dalad Banner Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(8): 161-166. (in Chinese))
- [14] 陈燕, 齐清文. 达拉特旗土地利用及水土保持措施现状遥感调查与制图[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 137-139. (CHEN Yan, QI Qingwen. Investigation on land use and water and soil conservation measures by remote sensing—Taking Dalate County, Inner Mongolia autonomous region for example [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(6): 137-139. (in Chinese))
- [15] 钟莉娜, 郭旭东, 赵文武, 等. 内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗土地利用结构变化对生态系统服务价值的影响[J]. 中国土地科学, 2014(10): 25-32. (ZHONG Lina, GUO Xudong, ZHAO Wewu, et al. Effects of land use structure changes on ecosystem service value: A case study of Dalateqi, Erdos [J]. China Land Sciences, 2014(10): 25-32. (in Chinese))
- [16] 赵峰, 鞠洪波, 刘华, 等. 基于生态工程区的土地利用变化和景观格局分析——以内蒙古达拉特旗为例[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 216-220. (ZHAO Feng, JU Hongbo, LIU Hua, et al. Land use changes and landscape analysis in the of ecological project region—A case study in dalate country [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 216-220. (in Chinese))
- [17] 姬宝霖, 吕忠义, 申向东, 等. 内蒙古达拉特旗十大孔兑综合治理方案研究[J]. 人民黄河, 2004, 26(1): 31-32. (JI Baolin, LYU Zhongyi, SHEN Xiangdong, et al. Study on an integrated management and control plan of the Hyperconcentration Tributaries in Dalad Banner Inner Mongolia [J]. Yellow River, 2004, 26(1): 31-32. (in Chinese))
- [18] 杨胜天, 朱启疆. 人机交互式解译在大尺度土壤侵蚀遥感调查中的作用[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 88-91. (YANG Shengtian, ZHU Qijiang. Affect of man-computer interactive interpretation method in soil erosion survey of large scale by remote sensing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 88-91. (in Chinese))
- [19] 娄和震, 杨胜天, 周秋文, 等. 延河流域 2000-2010 年土地利用/覆盖变化及驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 15-21. (LOU Hezhen, YANG Shengtian, ZHOU Qiwen, et al. Analysis of land use/cover change and driving forces in Yan River Basin from 2000 to 2010 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(4): 15-21. (in Chinese))
- [20] 任斐鹏, 江源, 熊兴, 等. 东江流域近 20 年土地利用变化的时空差异特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 143-152. (REN Feipeng, JIANG Yuan, XIONG Xin, et al. Characteristics of the spatial-temporal differences of land use changes in the Dongjiang River Basin from 1990 to 2009 [J]. Resources Science, 2011, 33(1): 143-152. (in Chinese))
- [21] 许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1641-1649. (XU Jiongxin. Temporal and spatial variations in erosion and sediment yield and the cause in the ten small tributaries to the Inner Mongolia Reach of the Yellow River [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1641-1649. (in Chinese))
- [22] 闫丽, 包慧娟, 郭佳. 内蒙古达拉特旗土地沙漠化动态研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2009, 38(3): 315-319. (YAN Li, BAO Huijuan, GUO Jia. The dynamic changes of land desertification of dalate county in Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2009, 38(3): 315-319. (in Chinese))

## (上接第 29 页)

- [9] 巫俊丽. 感潮江段事故溢油二维数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2006. (WU Junli. The two-dimensional simulation on the diffusion of emulsified oil in the tide sect of the Yangtze River [D]. Nanjing: Hhai University, 2006. (in Chinese))
- [10] 赵炎鑫, 王永桂, 张万顺, 等. 河道溢油污染事故二维数值模型研究[J]. 人民长江, 2012, 43(15): 81-84. (ZHAO Yanxin, WANG Yonggui, ZHANG Wanshun, et al. Two-dimensional numerical simulation model for oil spill in river [J]. Yangtze River, 2012, 43(15): 81-84. (in Chinese))
- [11] 张艳军, 雒文生, 雷阿林, 等. 河道溢油模型在三峡水质预警系统中的研究与应用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(1): 128-131. (ZHANG Yanjun, LUO Wensheng, LEI Alin, et al. Research and application of river oil spill model in advanced warning system of water quality of Three Gorges [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(1): 128-131. (in Chinese))
- [12] 刘栋, 林卫青, 钟宝昌, 等. 感潮河道溢油扩展、漂移特性实验[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2006, 21(6): 744-751. (LIU Dong, LIN Weiqing, ZHONG Baichang, et al. Characteristic experiment of spread and transport of oil spill in tidal river [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, A, 2006, 21(6): 744-751. (in Chinese))
- [13] 郭运武, 刘栋, 钟宝昌, 等. 风对河道溢油扩展、漂移影响的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2008, 23(4): 446-452. (GUO Yunwu, LIU Dong, ZHONG Baichang et al. Experimental investigations of wind effect on the oil spill spread and drift [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, A, 2008, 23(4): 446-452. (in Chinese))
- [14] Peishi QI, Zhiguo SHAO, Yunzhi LIU, Zheng QI, Lijun LI. Transportation of the Oil Slick in the Low-temperature River. ICBBE, 2010.
- [15] 胡云进, 邵会彩, 耿洛桑, 等. 梯形断面明渠流速分布的研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(6): 1102-1106. (HU Yunjin, GAO Huicai, GENG Luosang, et al. Laws of velocity distribution in trapezoidal open channels [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(6): 1102-1106. (in Chinese))