

# 穿越河流段输油管道环境风险评估及防控措施

张海磊

国家管网集团西南管道有限责任公司兰成渝输油分公司, 四川 成都

收稿日期: 2022年3月23日; 录用日期: 2022年6月6日; 发布日期: 2022年6月17日

## 摘要

识别并有效防控输油管道穿越河流段的环境风险一直是管道管理的重点工作, 本文以兰成渝分公司输油管道广元段为例, 评价输油管道在用阶段的失效可能性, 量化分析最大泄漏量和现有应急管理水平条件下溢油事件对下游环境风险受体造成的影响, 综合考虑溢油事故发生的可能性及事故发生后可能造成的环境后果建立输油管道穿越段的环境风险评价体系。最后结合环境风险评价结果及穿越段实际情况提出分级拦截布控措施, 为输油管道的风险控制及应急处理提供技术支持。

## 关键词

输油管道, 穿越河流, 环境风险, 防控措施

# Environmental Risk Assessment and Control Measures for Oil Pipelines Crossing the River Section

Hailei Zhang

Lanzhou Chengdu Chongqing Oil Transportation Branch of State Pipe Network Group Southwest Pipeline Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Jun. 6<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 17<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

It has always been the key of pipeline management that how to identify and effectively prevent the environmental risk of the oil pipeline crossing the river. In this study, taking Guangyuan section of Lan-Cheng-Yu product pipeline as an example, the failure possibility of the oil pipeline in the use stage was evaluated. The impact of oil spills on downstream environmental risk receptors under

the conditions of maximum leakage and existing emergency management level was quantitatively analyzed. Then, considering the possibility of oil spill accidents and the possible environmental consequences, the environmental risk assessment system of the oil pipeline crossing section was established. Finally, combined with the results of environmental risk assessment and the actual situation of the crossing section, hierarchical interception and control measures were proposed to provide technical support for the risk control and emergency treatment of the oil pipeline.

## Keywords

Oil Pipeline, Crossing River, Environmental Risk, Prevention and Control Measures

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

受自然地理条件限制,管道建设不可避免地需要穿越地表水体,其中不乏有大江大河。穿越河流段输油管道受施工条件、河流冲刷侵蚀作用等影响,管道泄漏概率显著增加,泄漏事故一旦发生,溢油通过地表水体迅速迁移扩散,势必对社会安全及经济发展造成极大负面影响[1] [2] [3]。因此,建立输油管道穿越河流段的环境风险评估方法,提出管道溢油事件的有效防控措施至关重要。

国内外学者对此做了大量有益的探索[4]-[9],但大部分评价体系采用定性或半定量的方法,存在较大的人为性,且大多对溢油事故发生的可能性及事故发生后实际应急水平考虑不够,割裂了溢油事件环境风险评价和溢油防控之间的联系,缺乏一套科学性高、普适性强、可操作性高的管道环境风险管控体系。

基于此,本文以兰成渝分公司成品油输油管道广元段为例,在调查收集输油管道概况、穿越河流水文信息、周边环境风险受体等资料的基础上,利用定量和半定量结合的方法进行管道环境风险评价。在对输油管道在用阶段失效可能性进行评价分级的基础上设置最不利的溢油情景,并结合穿越段实际应急能力,运用溢油在地表水中运移数学模型计算泄漏油品到达下游敏感点的时间及影响范围,得到较为可靠的溢油事件环境后果分级,最终建立判断矩阵评价穿越段输油管道的环境风险,并以此为据,提出管道泄漏事件的分级拦截布控措施。借助该评价体系,能够有效识别并降低输油管道的环境风险,对于同类型管道项目的环境风险管控及应急处理有着重要的理论和实际意义。

## 2. 环境风险评价方法

输油管道穿越河流段的环境风险大小主要跟溢油事故发生的可能性及事故发生后可能造成的环境后果有关。通过评价管道失效性表示事故发生的可能性,结合穿越点周边环境受体及实际应急管理水平,计算最大泄漏量、溢油扩散途径来评价溢油事件造成的环境后果。

### 2.1. 管道失效性分析

考虑第三方损坏、腐蚀、制造与施工缺陷、误操作、地质灾害五个方面对输油管道在用阶段失效可能性进行半定量评分[10]。每方面的得分为其下设多个评分项得分之和,评分项得分由下设列项中最接近实际情况的列项确定。按照失效可能性评分,将管道失效可能性划分为3个等级[11],其中,0~113分属于失效性高;114~272分属于失效性中等;273~500分属于失效性低。各评分项见表1。

**Table 1.** Scoring items for pipeline failure analysis

**表 1.** 管道失效性分析评分项

项目	评分项
第三方损坏	埋深、巡线、公众宣传、管道通行带和标识、打孔盗油、管道上方活动水平、管道定位与开挖响应、管道地面设施、公众保护态度、政府态度
腐蚀	介质腐蚀性、内腐蚀防护、土壤腐蚀性、阴极保护电位、阴保电位检测恒电位仪、杂散电流干扰、防腐层质量、防腐层检漏、保护工 - 人员、保护工 - 培训、外检测、阴保电流、管道内检测修正系数
制造与施工缺陷	运行安全裕量、设计系数、疲劳、水击危害、压力试验系数、轴向焊缝缺陷、环向焊缝缺陷、管体缺陷修复、管道内检测修正系数
误操作	危害识别、达到最大许可可用操作压力的可能性、安全保护系统、规程与作业指导、SCADA 通信与控制、健康检查、员工培训、数据与资料管理、维护计划执行、机械失误的防护
地质灾害	已识别灾害点、地形地貌、降雨敏感性、土体类型、管道敷设方式、人类工程活动、管道保护状况

## 2.2. 溢油事件环境影响

突发溢油事件的环境后果主要取决于溢油事件对环境风险受体(可能受到危害的企业外部人群、具有一定社会价值或生态环境功能的区域等)的影响程度。已有的一些环境影响分级体系[10] [11] [12]明确了溢油事件后果及对应的影响分级,但对于溢油事件造成的后果往往采用定性的方法判定,存在较大的人为性,且大多事故发生后实际应急水平考虑不够。本文考虑实际的应急能力、最大泄漏量条件下,溢油事件对周边环境风险受体的定量影响,将溢油事件环境后果分为三级,见表 2。

**Table 2.** Environmental impact grading table of oil spill events in the oil pipeline crossing section (modified from reference [13])

**表 2.** 输油管道穿越段溢油事件环境影响分级表(改自文献[13])

分级	事件
极严重	1) 溢油进入集中式地表水、地下水饮用水水源地保护区(包括一级、二级及准保护区),或农村及分散式饮用水源地保护区的; 2) 泄漏油品进入收纳水体后 24 h 流经范围内涉及跨国界的; 3) 溢油路径两侧 200 m 范围内,每千米段人口总数大于或等于 200 人。
较严重	1) 溢油进入生态保护红线划定的或具有水生态服务功能的其他水生态环境敏感区和脆弱区; 2) 泄漏油品进入收纳水体后 24 h 流经范围内涉及跨省界的; 3) 溢油路径两侧 200 m 范围内,每千米段人口总数大于或等于 100 人,小于 200 人。
不严重	不涉及上述情况

注:本表中给出的距离范围以到各类水环境保护目标或区域的边界为准。

其中,应急能力、最大泄漏量条件下溢油事件对周边环境风险受体的定量影响指标如下:

### 1) 泄漏量估算

溢油事故中油品泄漏量的多少直接决定了事故的规模大小,在管道泄漏事故环境风险评价中,考虑最不利的情况以确保事故能妥善解决。因此基于最不利的油品泄漏量和泄漏位置,按照管道截面 100%断裂的情况作为溢油情景。穿越点溢油事件发生至检测报警,距离泄漏点最近的阀室截断输油,此时,最大泄漏量为距离泄漏点最近两个阀室之间的输油管容积与溢油事件发生后距离泄漏点最近的阀室阀门全

开至全关这段时间内的泄漏量之和。

### 2) 溢油的扩散及迁移

当穿越段管道发生泄漏后, 首先会在河底土壤中渗流扩散, 这是一个庞杂的多孔介质多相流过程, 根据相关研究[14][15][16][17], 主要与泄漏压力、土壤孔隙度、土壤含水率等有关, 在实际情况中, 大多采用大开挖铺设管道穿越河流, 管道埋深一般较浅, 在最大泄漏量条件下, 较大的泄漏压力会使溢油迅速进入河流。

溢油进入地表水体后, 由于油品密度相对较小, 往往在水面上形成油膜, 根据费伊(Fay)提出的溢油扩散模型[18], 该过程在受到重力、惯性力、粘性力和表面张力的影响控制下可以分为三个阶段, 数学模型见公式(1)~公式(3)。此外, 形成的表面油膜还会在水流、风速和其它环境因素的作用下继续迁移, 因此, 穿越段管道泄漏后油品影响范围主要跟内力(溢油重力、惯性力、粘性力和表面张力)作用下扩散范围及外力(风力、水力)作用下迁移距离有关, 见公式(4)。

重力、惯性阶段:

$$L_1 = K_1 \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_w}\right) g V \cdot \sqrt{t}} \quad (1)$$

重力、粘滞性阶段:

$$L_2 = K_2 \cdot \sqrt[6]{\frac{(\rho_w - \rho_0) g V^2 t^2}{\rho_w \sqrt{\gamma_w}}} \quad (2)$$

表面张力、粘滞性阶段:

$$L_3 = K_3 \cdot \sqrt[4]{\frac{\sigma^2 t^2}{\rho_w^2 \gamma_w}} \quad (3)$$

式中:  $K$  为各扩展阶段的经验系数, 取  $K_1 = K_2 = 1.0$ ,  $K_3 = 1.33$ ;  $\rho_0$  为油的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $V$  为溢油量,  $\text{m}^3$ ;  $\sigma$  为净表面张力系数, 指空气与水的表面张力系数减去油与空气的表面张力系数再减去油与水的表面张力系数,  $\text{N/m}$ ;  $\gamma_w$  为水的运动粘滞系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $t$  为泄漏时间。

$$S = L_1 + L_2 + L_3 + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} (v_1 + \alpha_2 v_2) dt \quad (4)$$

式中:  $v_1$  水流速度,  $\text{m/s}$ ;  $v_2$  为水面 10 m 高处风速,  $\text{m/s}$ ;  $\alpha_2$  为风速对水流速度的贡献比, 取 3%。

距离穿越段最近的作业区会分派管道抢修组和应急拦油组迅速到现场。应急力量的到达时间、泄漏段环境应急处置措施则限制了泄漏量的大小以及泄漏油品对下游环境受体的影响程度。结合事故发生后管道抢修组到达时间, 估算最大泄漏量[18][19]。

### 3) 应急管理水平

溢油事件发生至检测报警, 距离穿越段最近的作业区会分派管道抢修组和应急拦油组迅速到现场。而应急力量的到达时间、泄漏段环境应急处置措施则限制了泄漏量的大小以及泄漏油品对下游环境受体的影响程度, 溢油事件能否妥善解决, 最终泄漏后果的严重程度跟管道方应急管理水平的强弱息息相关。因此, 考虑各穿越段实际应急管理水平, 修正泄漏量及泄漏面积的计算, 最终根据表 3 确定输油管道穿越段溢油事件环境影响分级。

## 2.3. 环境风险评估

结合各穿越点实际情况, 根据管道失效性分级, 以及最大泄漏量、现有应急能力水平下溢油对下游环境风险受体的影响, 建立判断矩阵确定穿越点输油管道的环境风险等级, 具体见表 3。

**Table 3.** Environmental risk rating matrix for oil pipeline crossing sections

**表 3.** 输油管道穿越段环境风险等级评定矩阵

后果分级环境风险管道失效性	低	中等	高
不严重	一般	一般	较大
较严重	一般	较大	重大
极严重	较大	重大	重大

### 3. 实例验证

#### 3.1. 输油管道概况

兰成渝分公司所辖成品油输油管道广元段从嘉陵江流域广元羊木镇进入，途径广元市朝天区、利州区、剑阁县、青川县，总长度约 100 km，管道穿越地表河流采用大开挖、定向钻或架设管桥方式铺设管道。在广元市境内共有 7 处穿越段，具体情况见表 4。

由于管线周边环境风险受体情况直接影响着管线泄漏事件造成后果的严重程度，除调查穿越段周边人口居住情况外，还重点收集管道沿线涉及的自然保护区、水源保护区、生态红线等环境敏感区信息 4 类 8 处，环境风险受体详细情况见表 4。

**Table 4.** Statistics on the main rivers crossing the Guangyuan section of the oil pipeline

**表 4.** 兰成渝输油管道广元段穿越主要河流概况统计表

序号	名称	行政位置	上游 - 下游 阀室	穿越方式	河面最大 宽度(m)	河水流速 (m/s)	潜在环境风险受体
1	广坪河穿越段	朝天区东溪河乡	广坪阀室 - 羊木阀室	大开挖	30	0.2~1.6	东溪河乡水源地保护区
2	羊木河穿越段	朝天区羊木镇	广坪阀室 - 羊木阀室	大开挖	110	0.2~1.8	羊木镇水源地保护区/嘉陵源湿地自然保护区
3	回龙河穿越点	利州区同心村	羊木阀室 - 广元分输站	大开挖	40	0.1~1.5	广元市区/嘉陵江干流
4	白龙江穿越段	利州区石龙村	白龙江阀室 - 紫兰坝阀室	悬索跨越	140	0.3~1.6	广元市利州区宝轮镇集中式饮用水水源保护区/剑门关、翠云廊风景名胜/嘉陵江干流
5	清江河穿越段 01	剑阁县下寺镇	清江河阀室 - 下寺阀室	定向钻	210	0.2~1.6	赤化镇饮用水水源地保护区/白龙江/剑门关、翠云廊风景名胜区/嘉陵江干流
6	清江河穿越段 02	赤化镇石羊村	清江河阀室 - 下寺阀室	定向钻	240	0.2~1.6	赤化镇饮用水水源地保护区/白龙江/剑门关、翠云廊风景名胜区/嘉陵江干流
7	清江河穿越段 03	赤化镇清江村	清江河阀室 - 下寺阀室	定向钻	210	0.2~1.6	清江河水厂水源地保护区/赤化镇饮用水水源地保护区/白龙江/剑门关、翠云廊风景名胜区/嘉陵江干流

### 3.2. 环境风险评估

以白龙江穿越段为例进行该输油管段的环境风险，根据资料收集及现场调查情况，对第三方损坏、腐蚀、制造与施工缺陷、误操作、地质灾害等评分项进行打分，评分项得分情况见表 5~9。

Table 5. Pipeline third-party damage score

表 5. 管道第三方损坏评分

埋深	巡线	公众宣传	管道通行带和标识	打孔盗油	管道上方活动水平	管道定位与开挖响应	管道地面设施	公众保护态度	政府态度	本项得分
15	15	5	5	15	15	9	8	5	5	97

Table 6. Pipeline corrosion score

表 6. 管道腐蚀评分

介质腐蚀性	内防腐防护	土壤腐蚀性	阴极保护电位	阴保电位检测	恒电位仪	杂散电流干扰	防腐层质量	防腐层检漏	保护工-人员	保护工-培训	外检测	阴保电流	管道内检测修正系数	本项得分
8	8	8	6	6	5	10	15	4	3	2	10	5	50%	95

Table 7. Pipeline manufacturing and construction defect score

表 7. 管道制造与施工缺陷评分

运行安全裕量	设计系数	疲劳	水击危害	压力试验系数	轴向焊缝缺陷	环向焊缝缺陷	管体缺陷修复	管道内检测修正系数	本项得分
15	10	10	10	5	20	15	10	50%	97.5

Table 8. Pipeline misoperation score

表 8. 管道误操作评分

危害识别	最大许可操作压力可能性	安全保护系统	规程与作业指导	SCADA 通信与控制	健康检查	员工培训	数据与资料管理	维护计划执行	机械失误的防护	本项得分
6	15	10	15	5	2	10	6	10	15	94

Table 9. Pipeline geological hazard score

表 9. 管道地质灾害评分

已识别灾害点	地形地貌	降雨敏感性	土体类型	管道敷设方式	人类工程活动	管道保护状况	本项得分
95	15	6	18	18	12	5	74

因此，白龙江穿越段失效可能性分值 457.5 分，失效性低。

白龙江穿越段管道两端交通便利，借助乡镇公路、国道 G212，救援人员和救援物资可在 26 min 内抵达。

穿越段管道采用悬索跨越方式穿越白龙江，设计压力 8 MPa，采用管径 457 mm，壁厚 8.7 mm，材质为 X52 的钢管进行油品输送，成品油每小时输送量为 900 m<sup>3</sup>，上下游分别有白龙江保护站和紫兰坝闸室，闸室间距 1.8 km。计算可得白龙江保护站和紫兰坝闸室段管容为：

$$(0.457 \div 2 - 0.0087)^2 \times 3.14 \times 1800 = 273.1 \text{ m}^3$$

若白龙江穿越段发生溢油，管道泄漏检测系统 120 秒内作出泄漏报警，距离泄漏点最近的闸室阀门 70 秒内全部关闭，该段时间油品泄漏量为：

$$900 \div 3600 \times (120 + 70) = 47.5 \text{ m}^3$$

因此，按照管道截面 100%断裂考虑，抢修组到达之前溢油量为：

$$273.1 + 47.5 = 320.6 \text{ m}^3$$

白龙江跨越处河床宽广，地势开阔，常年有水且水量较大。河道与管线位近正交，水面宽度约 85~125 m，河道水深约 6 m，河流流速范围：0.2~1.8 m/s，管道跨越处最大风速可达 28.7 m/s。穿越段周边 200 m 范围内，人员较密，且威胁下游饮用水水源保护区和剑门关、翠云廊风景名胜等环境敏感区。

根据上述泄漏量估算及溢油扩散模型，考虑最不利情况，穿越点管道溢油流入白龙江后扩散半径达 365 m，河岸植被、土壤遭受严重污染，影响附近城镇居民的生产和生活。此外，在风速和水流作用下，应急力量到达之前，泄漏油品迁移最大距离为 4516 m。

综上所述，考虑白龙江穿越段最不利的溢油状况下，泄漏油品将进入饮用水水源保护区范围，对周边生态环境、居民身体健康造成严重威胁。因此，据表 2，该溢油状况下白龙江穿越点溢油事件环境后果属于“极严重”类型。

白龙江穿越段管道失效性低，溢油事件环境影响属于“极严重”，根据表 3 中评定矩阵则白龙江穿越段环境风险为“较大”，同样对兰成渝输油管道广元段其他穿越段进行环境风险评价，结果见表 10。

**Table 10.** Environmental risk levels of the river crossing section of the Guangyuan section

**表 10.** 兰成渝输油管道广元段河流穿越段环境风险等级

序号	名称	后果分级	管道失效性分级	环境风险
1	广坪河穿越段	较严重	低	一般
2	羊木河穿越段	极严重	低	较大
3	回龙河穿越点	极严重	低	较大
4	白龙江穿越段	极严重	低	较大
5	清江河穿越段 01	较严重	低	一般
6	清江河穿越段 02	较严重	低	一般
7	清江河穿越段 03	极严重	低	较大

#### 4. 溢油防控措施

根据前文对各个河流穿越点的环境风险分析，一旦出现溢油事故，对下游的生态环境将不可避免的造成重大影响[20]。事故发生后，为减小溢出油品污染区域，必须根据现场情况对溢油点进行堵漏，并在最快的时间内告知水利部门，控制上下游拦河坝相关水闸，减缓江面水流速度从而减缓溢油扩散速度，同时根据溢油点、下游河道已有水利设施、周边外部可依托资料情况，提前布设拦油措施。结合溢油事

件实际情况, 本文提出分级拦截布控措施:

1) 泄漏点附近。采取围堰的方法控制泄漏油品继续流入下游河流, 开挖集油坑和导油沟, 确保集油坑容积应能满足油品泄漏量在应急力量到来之前的存放量。

2) 环境敏感受体附近。在进入集中式饮用水源地、自然保护区、生态红线、居民聚集区之前拦截布控。

3) 支流汇入干流之前。利用水文分析功能进行小流域分区, 分析管道穿越段各个小流域的分水岭以及流域盆地倾泻点(出水口), 在出水口之前的河段设置拦截控制点。

溢油防控措施可根据周边具体条件, 依托已有水利设施布设。围油栏的布放位置一般选择在桥梁、大坝、水闸、河流转弯处、漂浮物集中处等, 需提前布设锚固墩工程, 周边需提前储备围油栏、吸油栏等。对于规模较小的河流, 可利用已有桥梁坝体, 修筑编织袋土坝, 迎水面敷设隔水布, 上游抛洒草垛, 减缓油污扩散。周边需提前储备编织袋、隔水布、涵管、草垛等。

同样以白龙江穿越段为例, 结合上文提出的分级拦截布控措施及河道具体情况, 一级拦截布控点 A1 设置在泄漏点附近, 距穿越点约 600 m; 二级拦截布控点 A2 设置在广元市利州区宝轮镇集中式饮用水水源二级保护区边缘, 白龙江大桥附近, 距穿越点约 2400 m; 三级拦截布控点 A3 设置在进入剑门关、翠云廊风景名胜区三级保护区之前, 白龙江汇入嘉陵江的倾泻口上游, 距穿越点约 8300 m。具体布控措施见图 1。

提前布设拦截措施后, 应急抢险人员到达现场便可迅速架设围油栏, 对水面漂流浮油及岸边溢油进行回收, 避免溢油继续向下迁移, 大大减小溢油事件对环境的影响, 根据此原则, 对其他穿越段设置分级拦截布控措施(见图 2), 可对穿越河流段输油管道溢油事件进行有效管控。

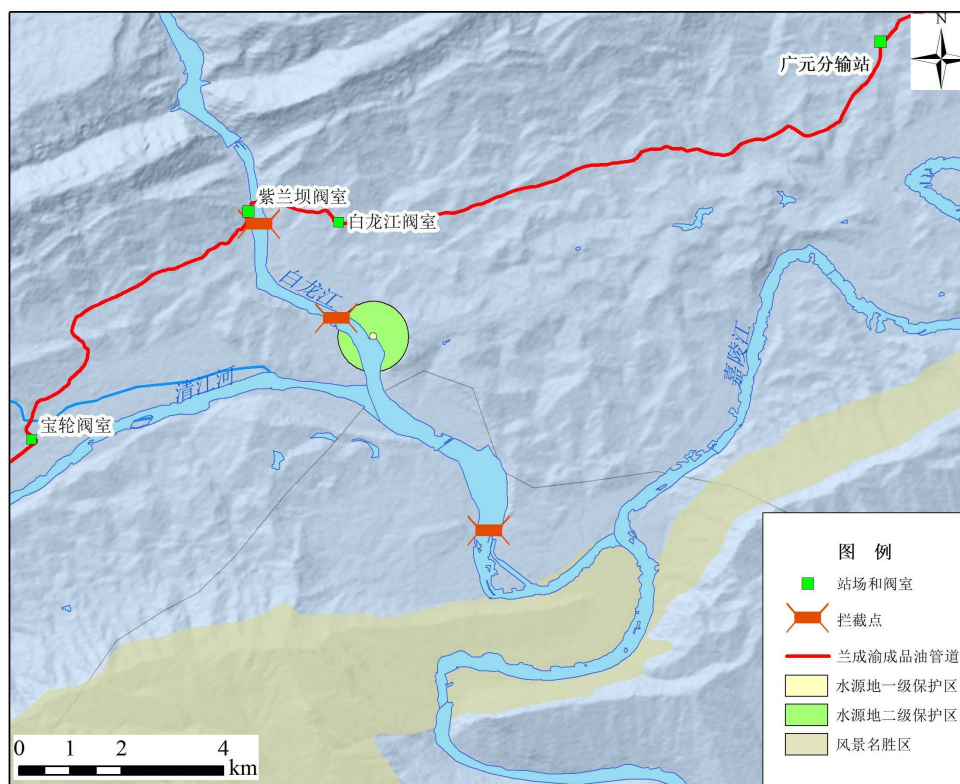
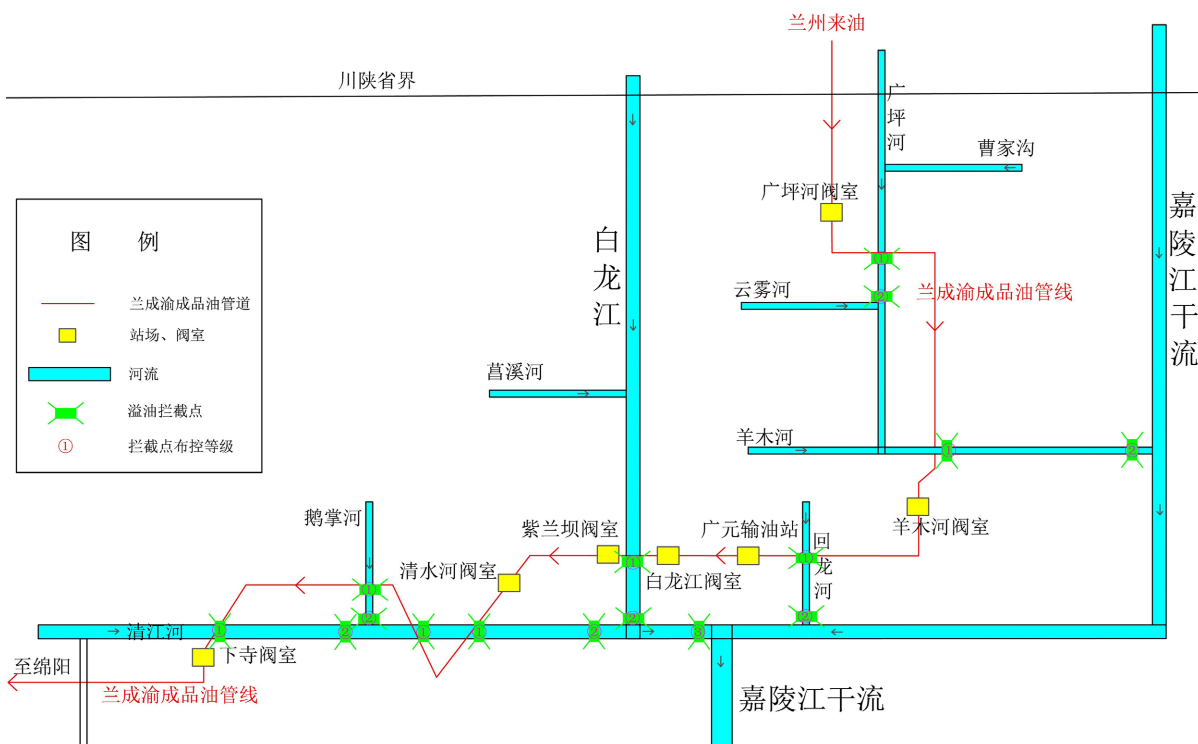


Figure 1. Arrangement and control position of interception point of Bailongjiang River Basin, a first-class tributary of Jialing River

图 1. 嘉陵江一级支流白龙江流域穿越点拦截点布控位置





**Figure 2.** Location map of oil spill interception and deployment at the crossing point of Guangyuan section of oil pipeline  
**图 2.** 输油管道广元段穿越点溢油拦截布控位置图

### 5. 结论

1) 本文通过评价输油管道在用阶段失效可能性, 设置最不利的溢油情景, 结合穿越段实际应急能力, 运用溢油在地表水中迁移模型, 建立了科学可靠的输油管道穿越段环境风险评价体系。并以此为依据, 提出管道泄漏事件的分级拦截布控措施。通过实例研究, 该环境风险管控体系能够有效识别并降低输油管道的环境风险。

2) 在调查收集输油管道概况、穿越河流水文信息、周边环境风险受体的基础上, 对兰成渝分公司成品油输油管道广元段7处穿越点进行了环境风险评价。结果显示, 输油管道在用阶段失效可能性均为“低”, 但泄漏事故一旦发生, 造成的环境影响属“极严重”或“较严重”, 整体环境风险“较大”或“一般”, 无“重大”环境风险穿越段。

3) 根据各穿越段环境风险评价结果, 综合考虑穿越段实际条件、溢油事件发生后应急能力、溢油路径环境风险受体情况, 分别在穿越段附近、环境风险受体之前、河流支流汇入干流之前提出了分级拦截布控措施, 确定了具体拦截布控位置。

### 基金项目

国家管网集团西南管道有限责任公司科技研发项目“山区油气管道线路设计与工程防护关键技术研究”(2020B-3106-0501)。

### 参考文献

[1] Ji, Z., Johnson, W.R. and Wikel, G.L. (2014) Statistics of Extremes in Oil Spill Risk Analysis. *Environmental Science & Technology*, 48, 10505-10510. <https://doi.org/10.1021/es501515j>

- [2] 刘胜利. 输油管道事故时间特征及溢油扩散范围研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2020.
- [3] 李大全, 姚安林. 成品油管道泄漏扩散规律分析[J]. 油气储运, 2006, 25(8): 18-24.
- [4] 丁毅, 梁林佐, 林冬, 等. 输油管道水环境风险评估方法构建[J]. 油气田环境保护, 2013, 23(6): 58-60.
- [5] 马红娜, 李彦娥, 武征. 成品油管道泄漏的环境风险评价[J]. 油气储运, 2011, 30(11): 801-804.
- [6] Bonvicini, S., Antonioni, G. and Cozzani, V. (2018) Assessment of the Risk Related to Environmental Damage Following Major Accidents in Onshore Pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **56**, 505-516. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.005>
- [7] 班杨. 长庆油田某采油厂输油管道环境风险评估研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [8] 赵汉青. 我国油气管道的事故成因及环境预防措施[J]. 油气储运, 2015, 34(4): 368-372.
- [9] 王磊, 余曦, 虎蕾. 原油管道泄漏对地表水环境风险评估[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(12): 193.
- [10] 张华兵, 周利剑, 郑洪龙, 等. SYT6891.1-2012. 油气管道风险评价方法第1部分: 半定量评价法[S]. 北京: 国家能源局, 2012.
- [11] Bonvicini, S., Antonioni, G., Morra, P., et al. (2015) Quantitative Assessment of Environmental Risk Due to Accidental Spills from Onshore Pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*, **93**, 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.007>
- [12] 戴联双, 郑洪龙, 程五一, 等. 油气管道风险可接受准则与指标模型[J]. 油气储运, 2009, 28(8): 1-4.
- [13] 周志国, 杨洋洋, 华俊杰, 等. GB/T 38076-2019. 输油管道环境风险评估与防控技术指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [14] Ambituuni, A., Amezaga, J.M. and Werner, D. (2015) Risk Assessment of Petroleum Product Transportation by Road: A Framework for Regulatory Improvement. *Safety Science*, **79**, 324-335. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.06.022>
- [15] 刁宇, 王宁峰, 刘朝阳, 等. 输油管道泄漏地下水污染风险预警评价方法[J]. 油气储运, 2021, 40(3): 300-305.
- [16] Dong, H., Wei, L. and Wang, Q. (2014) A Study on Oil Pipeline Risk Assessment Technique Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Open Petroleum Engineering Journal*, **7**, 125-129. <https://doi.org/10.2174/1874834101407010125>
- [17] Miao, C. and Zhao, J. (2015) Risk Analysis for the Urban Buried Gas Pipeline with Fuzzy Comprehensive Assessment Method. *Journal of Pressure Vessel Technology*, **134**, Article ID: 021702. <https://doi.org/10.1115/1.4004625>
- [18] 朱毅飞, 朱建华, 张建礼. 甬沪宁进口原油管道工程的环境风险评估[J]. 油气储运, 2005, 24(10): 5-8.
- [19] 吴国忠, 王迪, 赵文浩, 等. 埋地输油管道泄漏污染物地表运移特征[J]. 化工学报, 2017, 68(S1): 111-116.
- [20] 张华兵, 王新. 基于风险评价的管道安全距离确定方法[J]. 油气储运, 2018, 37(1): 20-23.