

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.02.001

基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究

黄国如^{1,2},王欣¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院,广东 广州 510640;
2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室,广东 广州 510640)

摘要:针对目前存在的市政排水与水利排涝两个标准的衔接仍无规范统一方法的问题,以广州市东濠涌流域为研究区域,采用城市综合流域排水模型 InfoWorks ICM 建立东濠涌流域管道、河道及地面二维耦合模型,分析计算市政排水1年一遇与水利排涝5年一遇以及市政排水1年一遇与水利排涝10年一遇两种情况下的标准衔接关系,为城市排水防涝规划设计提供技术支撑。结果表明:1年一遇市政排水标准与10年一遇水利排涝标准的组合能够满足流域涝水顺利排除的要求,但管道排水口底高程距河底高程的距离过短也会对管道的水位顶托产生一定影响,故建议城市排水管网的规划建设应至少保证排水口底高程高于河道底高程0.5 m以上。

关键词:市政排水;水利排涝;标准衔接;城市雨洪模型;广州市

中图分类号:TU991 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)02-0001-05

Study on standard syntaxis of urban drainage between pipe and river based on urban storm flood models

HUANG Guoru^{1,2}, WANG Xin¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: There has been no unified method for the syntaxis of design standards of urban drainage and waterlogging drainage up to now. In order to study the standard syntaxis for two scenarios (municipal drainage of a one-year frequency storm flood with waterlogging drainage of a five-year frequency storm flood, and municipal drainage of a one-year frequency storm flood with waterlogging drainage of a ten-year frequency storm flood) in the Donghaochong Catchment, a two-dimensional urban storm flood model which couples underground drainage pipes, rivers, and surface ground was established using Infoworks ICM, providing technical support for the planning and design of urban drainage waterlogging. The results show that waterlogging will not occur in the Donghaochong Catchment with the combined standards for municipal drainage of a one-year frequency storm flood and waterlogging drainage of a ten-year frequency storm flood. However, the distance from the pipe outlet bottom to the river bottom also impacts the water level in the pipes. Therefore, it is suggested that the elevation of the pipe outlet bottom should be 0.5 meters higher than the river bottom elevation in the design of urban drainage networks.

Key words: municipal drainage; waterlogging drainage; standard syntaxis; urban storm flood model; Guangzhou City

城市内涝是指因强降水或持续性降水超出城市的排水能力而导致城市积水灾害的现象^[1]。对于近年来频频发生的城市内涝灾害,人们试图通过提高城市管道设计标准以及重新制定暴雨强度公式等措施来解决。实际上,一个更为突出的问题是市政排水与水利排涝之间存在标准衔接问题^[2]。市政

基金项目:广东省科技计划项目(2016A020223003);广东省水利科技创新项目(2016-32)
作者简介:黄国如(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:huanggr@scut.edu.cn

排水是指利用市政管网汇集较小面积的雨水并最终排入干、支流河道,主管部门为城建部门;水利排涝则是在农田排涝计算的基础上发展而来,主要是排除由市政管渠及地面汇流等汇入河道产生的较大区域暴雨涝水,主管部门为水利部门^[3]。目前,市政排水与水利排涝两个标准的衔接仍无规范统一的方法,因而研究城市排水标准与排涝标准的衔接关系,找出一套解决排水标准与排涝标准衔接问题的合理方法,保证设计重现期内的降雨能够顺利排出,是非常必要的^[4]。发达国家的城市排水体系大多为“双排水系统”,即有大、小两套系统。美国和澳大利亚标准体系明确了小暴雨排水系统和大暴雨排水系统控制标准^[5]。小排水系统一般针对城市常规降雨,通过雨水管道系统收集排放,设计暴雨重现期一般为2~10年一遇;大排水系统则主要针对城市的超常暴雨,由绿地、道路、调蓄水池及隧道等协同排除小排水系统无法传输的径流,设计暴雨重现期一般为50~100年一遇。国外城市的防洪、排涝和管道标准其实是统一的,并不存在大、小排水系统标准无法衔接统一的情况。

国内学者主要从暴雨选择、设计暴雨重现期及设计排涝流量3方面研究市政排水与水利排涝间的标准衔接关系,然而现有的对比研究大多采用传统方法进行分析计算^[2,4,6-8],未基于管网与河网耦合模型进行两级排涝标准间的衔接分析。有鉴于此,本文采用城市综合流域排水模型(InfoWorks ICM)对广州市东濠涌流域进行一维管网、一维河道及二维地表的耦合建模分析,更为真实地模拟地下排水管网系统与地表收纳水体之间的相互作用。

1 研究区域概况

东濠涌流域地处广州最古老的中心城区越秀区内,流域内水系主要包括麓湖、东濠涌及新河浦涌。东濠涌发源于白云山长腰岭之西,自北向南流经鹿鸣岗、下塘村、越秀南路等地,沿途汇入六脉渠、孖鱼岗涌、玉带涌、新河浦涌来水,于江湾大酒店东边的竺横沙汇入珠江前航道,全流域面积12.40 km²。东濠涌上游为麓湖,麓湖控制集雨面积1.92 km²,东濠涌在麓湖以下的河长为4.08 km,其中上游段(麓湖至东风路段)为断面规整的矩形暗渠箱,横断面宽5~8 m;下游段(截污闸至珠江前航道段)经整治后为明渠河道,横断面宽11~31 m。新河浦涌连接东湖和东濠涌,沿程流经东川路、东华路、东湖路,于广东省省委附近汇入东湖,全长2.18 km,皆为明渠,横断面宽12~24 m。东濠涌流域水系如图1所示。

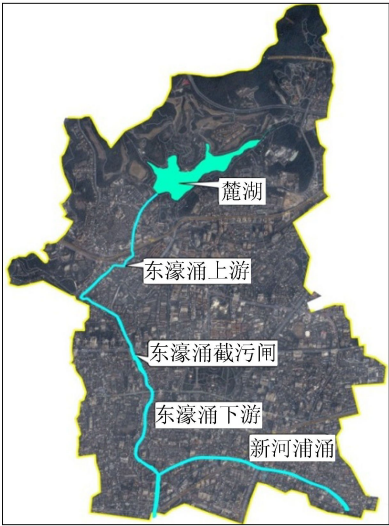


图1 东濠涌流域水系

2 InfoWorks ICM 构建

2.1 InfoWorks ICM 简介

InfoWorks ICM 能完整地将城市排水管网、河道一维水力模型与城市/流域二维洪涝淹没模型结合在一起,实现在单个模拟引擎内组合这些模型引擎及功能。它可以完整地模拟城市雨水循环系统,实现城市排水管网系统模型与河道模型的整合,更为真实地模拟城市排水系统与地表收纳水体之间的交互作用。其主要模块包括排水管网水力模型(水文模块、管道水力模块、污水量计算模块等)、河道水力模型、二维城市/流域洪涝淹没模型、实时控制模块、水质模块、可持续构筑物(SUDS)模块等^[3]。

InfoWorks ICM 内置可供选择的汇流模型包括双线性水库(Wallingford)模型、大型贡献面积径流模型、SPRINT 径流模型、Desbordes 径流模型、SWMM 径流模型等,采用 Preissmann Slot 方法进行超负荷管道水流模拟,能够模拟各种复杂的水力状况;InfoWorks ICM 可以模拟复杂的河网和滞洪区,包括树枝状、分叉、回路河网以及受堤坝或防洪堤保护的滞洪区,还可模拟复杂的水工结构,如泵、闸、堰等。二维城市洪涝淹没模型作为一个精细的地面洪水演算模型,可根据地面高程模型反映道路、建筑物等对水流的引导和阻挡作用,反映地面上不同类型地块,如道路、草地等,其糙率对流速的影响^[9]。

2.2 网络结构及其模型数据构建

建模所需数据包括研究区域内的地形、排水管网、河道、道路及遥感影像等资料,为了得到精确完整的模型构建数据,对所获资料进行如下处理。

- a. 对 CAD 数据分别进行节点图层、管线图层、文字属性及高程点等数据提取;
- b. 将提取所得的节点、管线图层数据及文字属

性数据分层导入 GIS;

- c. 采用 GIS 强大的空间分析功能匹配节点及管线的相关属性;
- d. 建立基于一定规则的节点、管线的拓扑关系,用 SQL 语句对节点管线的连接错误进行检查纠错;
- e. 为了提高计算效率,本文仅对区域的排水干管进行计算分析,故需概化管道网络,主要包括删除雨水篦及其连接管线、删除较小的支管;
- f. 整理河道走向及断面数据;
- g. 对高程点数据进行插值处理,查找高程突变,并进行纠错;

将处理好的管道网络数据导入 InfoWorks ICM,并进行项目网络检查,最终得到东濠涌流域管网概化图。概化后的管网主要包括 2 997 个节点、3 009 个管道、38 个出水口。

2.3 子汇水区划分及参数设置

InfoWorks ICM 采用分布式方法计算汇水区水量,即每个汇水区根据实际管网布置范围划分为一系列的子汇水区,每个子汇水区再分为路面、屋面及其他等产流表面。计算引擎在产流表面的基础上根据所采用的降雨径流模型计算水量,然后每个子汇水区加和其所有产流表面产生的径流,得到子汇水区总径流量。每个汇水区及其内部各产流表面的面积和相应参数设置对径流量计算具有重要影响。采用 InfoWorks ICM 自动创建子汇水区,再辅以手动调整,最终将整个区域划分为 2 897 个子汇水区,其中最小、最大子汇水区面积分别为 0. 001 hm²、7. 019 hm²。

城市由不同类型的下垫面(可渗透/不可渗透)组成,每种表面对应的产汇流规律都不尽相同。参考 InfoWorks ICM 使用手册及相关文献^[9],将东濠涌流域地形图及遥感影像图划分为屋面、道路、其他 3 种,采用固定径流比例模型(Fixed),参数为固定径流系数。3 种特定表面的产汇流参数见表 1。

表 1 地表产汇流参数

下垫面种类	下垫面类型	汇流模型	产流参数	产流模型	固定径流系数	初损值/mm
屋面	不透水	Wallingford	5	Fixed	0. 9	5
道路	不透水	Wallingford	7	Fixed	0. 8	5
其他	透 水	Wallingford	10	NewUK	0. 6	2

2.4 管道、河道与地面耦合

a. 管道与河道耦合。管网模型与河网模型主要通过管网出水口进行耦合,主要操作是将管道出水口拖拽至河道中心线,打断生成新的河道断面,并设定出水口节点类型为独立节点(break),见图 2。东濠涌管网中共有 38 个出水口,其中,29 个出水口直接排入河道,9 个出水口排入流域内较小的蓄水池。

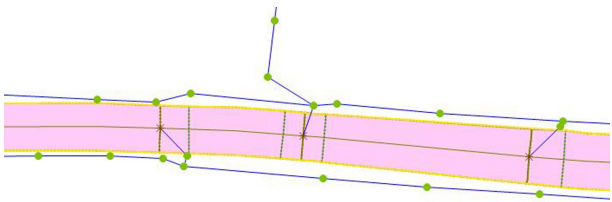


图 2 InfoWorks ICM 管道与河道耦合示意图

b. 管道与二维地面耦合。管道与二维地面耦合只需将 2D 区间内所有节点的洪水类型设定为 2D 即可。

c. 河道与二维地面耦合。一维河道建立后,先创建河道边界,河道边界在 2D 网格化时起起到空白区功能,使河道内部不生成网格,网格沿着河道边界生成。之后将 2D 区间和一维河道进行关联,建立溢流连接,即可使得一维河道与二维地面网格之间能够产生水量交互计算。河道与二维地面耦合示意图见图 3。

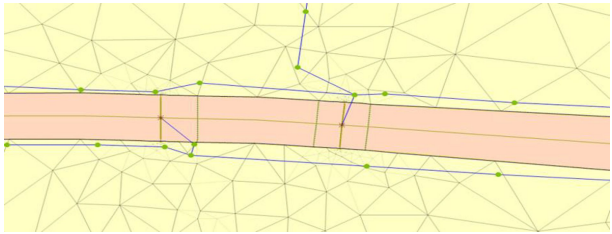


图 3 河道与二维地面的耦合示意图

2.5 设计降雨过程

设计暴雨采用广州市暴雨强度公式生成:

$$q = \frac{3618. 427(1 + 0. 438\lg P)}{(t + 11. 259)^{0. 750}} \tag{1}$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为暴雨重现期, a ; t 为汇流历时, min 。

考虑到河道有一定的滞蓄作用,降雨历时选 180 min,雨峰系数取为 $r=0. 4$,即暴雨强度峰值出现在降雨开始后 72 min。采用芝加哥雨型,以 3 min 为一记录间隔,推导出降雨历时为 3 h 的广州市暴雨强度过程线。

3 结果及分析

3.1 管道模拟

对东濠涌流域现状管道,设定出水口为自由出流,利用 InfoWorks ICM 进行 1 年一遇和 2 年一遇设计降雨过程的管道过水能力模拟。管道的负荷状态是指管道内水流的充满程度,InfoWorks ICM 用超负荷状态 S 来反映管道的负荷状态,其表示的含义见表 2。统计研究区排水节点溢流及管道超负荷情况,结果见表 3。

表 2 超负荷状态取值含义

超负荷状态	是否处于超负荷状态	含义	超负荷原因
S=0.5	否	管道内的水深为管道深度的 50%	
S=0.8	否	管道内的水深为管道深度的 80%	
S=1	是	水力坡度小于管道坡度	由于下游管道顶托而超负荷
S=2	是	水力坡度大于管道坡度	由于管道本身过流能力限制而超负荷

表 3 不同重现期暴雨条件下节点溢流和通道满流情况统计

管网情况	降雨重现期	暴雨强度峰值/ (mm·h ⁻¹)	降雨总量/ mm	最大节点溢流量/m ³	最长溢流时间/h	涝点数量/个	超负荷管道数量/条		满流管道数量/条	满流率/%
							S=1	S=2		
现状	1 年一遇	211.51	76.12	2547.6	2.10	650	1169	715	1884	62.6
	2 年一遇	234.39	86.15	2889.5	2.43	773	1181	781	1962	65.2
改造后	1 年一遇	211.51	76.12	186.8	0.43	14	1099	418	1517	50.4
	2 年一遇	234.39	86.15	390.8	0.60	160	1246	542	1788	59.4

注:满流率=满流管道数量/排水管道总量×100%。

为了满足本文关于市政排水与水利排涝标准衔接研究需要,对东濠涌流域不足 1 年一遇过流能力的管道进行改造,使之满足 1 年一遇的过流能力需求。对改造后的管网重新进行 1 年一遇和 2 年一遇过流能力模拟,结果见表 3。由表 3 可知,东濠涌流域现状管网经改造后,1 年一遇和 2 年一遇最大节点溢流量分别为 186.8 m³ 和 390.8 m³,溢流时长分别为 0.43 h 和 0.6 h,涝点个数分别为 14 和 160,满流率减少至 50.4% 和 59.4%,基本满足 1 年一遇设计降雨不淹,即认为改造后的管网基本满足 1 年一遇过流要求。

3.2 河道模拟

东濠涌流域以东濠涌作为主排涝渠,涝水通过闸泵联排的方式排入珠江。由于珠江为感潮河段,水位受潮汐影响,加上闸泵联排的运行方式未知,导致建模验证市政排水与水利排涝衔接关系的影响因素过多;因此假定东濠涌河道出口仅采用泵排方式,用河网水动力模型分别计算东濠涌流域现状河道在水利排涝 5 年一遇、10 年一遇设计暴雨下河道出口的泵排流量。

分别采用综合单位线法及推理公式法推求东濠涌流域 5 年一遇及 10 年一遇设计洪水过程线,经分析对比后,采用综合单位线法所得流量过程线作为东濠涌河网水动力模型的上游边界条件,以河道出口的泵站抽排流量过程作为下游边界条件,设定预排水深至 0.5 m,当计算河道最高水面线低于沿程河堤高程时,即认为设定的泵排流量满足设计重现期要求。

经模型分析计算,当东濠涌河道出口泵排流量为 55 m³/s 时,计算所得最高水面线满足 5 年一遇水利排涝设计要求;当东濠涌河道出口泵排流量为 72

由表 3 可知,现状 1 年一遇和 2 年一遇最大节点溢流量分别为 2547.6 m³ 和 2889.5 m³,溢流时长分别为 2.10 h 和 2.43 h,涝点个数分别为 650 和 773,满流率均超过 50%,分别为 62.6% 和 65.2%。总体来说,随着降雨重现期增加,最大节点溢流量、涝点个数和最长溢流时间亦增加,在 1 年一遇和 2 年一遇低重现期暴雨条件下,东濠涌流域的排水管网存在较为严重的节点溢流和管道超负荷情况,可见东濠涌流域大片管网过流能力不足 1 年一遇设计暴雨标准。

m³/s 时,计算所得最高水面线满足 10 年一遇水利排涝设计要求。

3.3 管道、河道与地面耦合模拟

3.3.1 市政 1 年一遇与水利 5 年一遇

对构建完成的管道、河道及二维地面模型,以市政排水 1 年一遇设计降雨过程作为降雨输入,河道出口设置满足水利 5 年一遇排涝要求的 55m³/s 的泵站抽排流量,设定当河道出口处水位高于 5.5m 时泵站开启,模拟得到地面积水情况和管道超负荷状态,结果分别见表 4 和表 5。

表 4 地面积水情况统计

淹没水深/m	市政 1 年一遇与水利 5 年一遇组合		市政 1 年一遇与水利 10 年一遇组合	
	淹没面积/ hm ²	淹没点数/个	淹没面积/ hm ²	淹没点数/个
0.1~0.3	4.50	294	0.85	63
0.3~0.5	0.74	58	0.29	20
0.5~1.0	0.45	36	0.29	25
>1.0	0.08	8	0.03	3

表 5 管道超负荷状态统计(设计重现期为 1 年)

S<0.5		0.5≤S<0.8		0.8≤S<1		1≤S<2		S≥2	
长度/ km	比例/ %	长度/ km	比例/ %	长度/ km	比例/ %	长度/ km	比例/ %	长度/ km	比例/ %
8.2	11.5	10.3	14.4	5.4	7.6	37.5	52.7	9.9	13.8

由表 4 可见,虽然市政排水 1 年一遇与水利排涝 5 年一遇组合已满足 1 年一遇过流能力,但由于河道水位顶托,管道下游不少节点仍会出现一定程度溢流,其中淹没水深达到 0.1~0.3 m 的淹没点数最多,有 294 个,淹没面积为 4.50 hm²;大于 1m 的淹没点数最少,有 8 个,淹没面积为 0.08 hm²。

由表 5 可知,管网系统半载以下运行的管道比例为 11.5%,半载至八成满运行的为 14.4%,八成

满至满载运行的为 7.6%,满载运行的为 66.5%,其中由于下游管道顶托造成满载运行的为 52.7%,由于管道自身过流能力不足造成满载运行的为 13.8%,造成管道满流的原因主要是河道水位顶托导致管道雨水无法顺利排出,经模拟计算可以得出 5 年一遇水利排涝标准无法满足市政管网 1 年一遇排水要求。

3.3.2 市政 1 年一遇与水利 10 年一遇

对构建完成的管道、河道及二维地面模型,以市政排水 1 年一遇设计降雨过程作为降雨输入,河道出口设置满足水利 10 年一遇排涝要求的 72 m³/s 的泵站抽排流量,设定当河道出口处水位高于 5.5 m 时泵站开启,模拟得到地面积水情况,结果见表 4。由表 4 可知,在管网满足 1 年一遇过流能力的情况下,与满足 10 年一遇过流能力的河道连接,虽然仍有部分区域出现积水状况,但相比于市政 1 年一遇和水利 5 年一遇标准的组合,淹没点数和淹没面积明显减少,整个流域的涝水基本能够正常排放,即认为 10 年一遇水利排涝标准满足市政排水 1 年一遇要求。

3.3.3 出水口高程对管道与河道的衔接关系影响

统计分析各管道出水口底高程距河底高程的距离,发现两种标准组合情况中发生溢流的管道出水口底高程距河底高程的距离都低于 0.3 m,其中在 1 年一遇市政排水与 10 年一遇水利排涝的标准组合情况下仍出现溢流的管道,其管道出水口底高程等于河底高程。可见,除却两种标准间的不适应会带来流域的排水不畅以外,管道出水口底高程距河底高程的距离也会导致管网排水不畅。这主要是因为,在整个排涝过程中,河道内水深多高于 0.5 m,若管道出水口高程设置在距河底高程较近处,会导致该管道长时间处于河道水位顶托状态使排水不畅,因而,建议新规划的管网应保证管道出水口底高程高于河道底高程至少 0.5 m,以保证管道涝水能顺利排至河道。

4 结 论

利用 InfoWorks ICM 构建了东濠涌流域管道、河道及地面二维的耦合模型,分析市政排水与水利排涝标准两者之间的衔接关系。经模拟计算得出 5 年一遇水利排涝标准无法满足市政管网 1 年一遇排水要求,而市政排水 1 年一遇与水利排涝 10 年一遇的标准组合能够协同排除城市流域涝水。市政排水与水利排涝是否能够协同排除流域涝水不仅与两标准的组合情况有关,还与市政排水管道出水口底高程距河底高程的距离有关,若管道出水口距河底高程的距离过短,会导致管道长时间处于水位顶托状态,造成排水不畅。建议在城市排水管网规划中,应保

证管道出水口底高程高于河底高程至少 0.5 m,以确保管道涝水能顺利排至河道。

参考文献:

[1] 车伍,杨正,赵杨,等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水, 2013,29(16):13-19. (CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China [J]. China Water & Wastewater, 2013,29(16):13-19. (in Chinese))

[2] 陆廷春. 南京市六合区市政排水与水利排涝设计暴雨重现期衔接关系[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(6):191-194. (LU Tingchun. Study on connection relationship between return period of municipal drainage system and waterlogged drainage system in Liuhe district of Nanjing City [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012,10(6):191-194. (in Chinese))

[3] 曾娇娇. 市政排水与水利排涝标准衔接研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.

[4] 张明珠,曾娇娇,黄国如,等. 市政排水与水利排涝设计暴雨重现期衔接关系的分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):131-135. (ZHANG Mingzhu, ZENG Jiaojiao, HUANG Guoru, et al. Analysis of cohesive relationship for return period of design rainstorm between municipal sewerage and waterlogging drainage[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015,26(1):131-135. (in Chinese))

[5] 谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势[J]. 城市规划,2013,37(2):45-50. (XIE Yingxia. Development of drainage planning in view of frequent urban waterlogging disasters[J]. City Planning Review, 2013,37(2):45-50. (in Chinese))

[6] 邵尧明,邵丹娜. 杭州市设计暴雨强度信息技术研究[J]. 中国给水排水,2006,22(11):55-59. (SHAO Yaoming, SHAO Danna. Study on information technology of design storm intensity in Hangzhou City [J]. China Water & Wastewater, 2006,22(11):55-59. (in Chinese))

[7] 周建康,朱春龙,罗国平. 太湖流域小圩区设计排涝模数计算[J]. 中国给水排水,2004,20(12):64-66. (ZHOU Jiankang, ZHU Chunlong, LUO Guoping. Calculation for the designed flood drainage modulus in small lowlying region of Taihu Lake Basin [J]. China Water & Wastewater, 2004,20(12):64-66. (in Chinese))

[8] 刘俊,俞芳琴,张建涛,等. 城市管道排水与河道排涝设计标准的关系[J]. 中国给水排水,2007,23(2):43-45. (LIU Jun, YU Fangqin, ZHANG Jiantao, et al. Study on relationship between design standards of pipe and river drainage[J]. China Water & Wastewater, 2007,23(2):43-45. (in Chinese))

[9] 黄维. 城市排水管网水力模拟及内涝风险评估[D]. 广州:华南理工大学,2016.

(收稿日期:2016-09-13 编辑:徐 娟)