

基于层次分析法的河流型饮用水水源地选址评价

杜大仲¹, 孟宪林¹, 马放¹, 张建琪²

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨, mafang@hit.edu.cn;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, 21042 Baltimore County, USA)

摘要: 为从源头对饮用水源地实施有效保护, 对河流型饮用水源地选址合理性进行科学评估, 从法律制约、环境质量、水资源保障和环境风险角度, 选择 28 个关键影响因子构建水源地选址评价体系. 基于层析分析法建立评价体系数学模型, 采用文献分析和专家问卷调查相结合的方法确定各级影响因子的权重, 并将单准则下的权重进行合成. 依据法律法规、技术标准和统计数据对影响因子进行分级和分值量化. 通过因子的分值和权重进行加权计算, 可给出选址评估建议.

关键词: 河流型饮用水水源地; 选址; 评价体系; 层次分析法; 权重

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)06-0034-06

Site selection assessment of River drinking water resources based on analytic hierarchy process

DU Da-zhong¹, MENG Xian-lin¹, MA Fang¹, CHANG Chein-chi²

(1. State Key Lab of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, mafang@hit.edu.cn; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, 21042 Baltimore County, USA)

Abstract: To effectively protect drinking water resources, a scientific assessment on site selection of River drinking water resources was carried out. Twenty-eight key factors including law, environmental quality, water resources assurance and environmental risk were selected, and based on analytic hierarchy process (AHP), a mathematical model of assessment system was established. The weight of factors was defined by the method of document data and expert questionnaire, and these weights were synthesized under single criterion. These influence factors were classified and quantized with laws, technical standards and statistical data. According to the calculation of factor scores and weights, the recommendations of site selection can be given.

Key words: River drinking water resources; site selection; assessment system; analytic hierarchy process; weights

近年来, 饮用水水源地保护问题已成为关系国计民生的重大问题. 据国家环境保护部统计, 2009 年监测的 397 个重点城市集中式饮用水源地中, 达标水量为 158.8 亿 t, 占 73.0%; 不达标水量为 58.8 亿 t, 占 27.0%^[1]. 中国饮用水水源地污染已相当突出, 尤其是河流型饮用水水源地

因其供水量最大, 水质达标率最差, 污染成因复杂而成为重点关注问题^[2]. 目前, 国内外学者对饮用水水源地的污染防治研究多集中在污染物削减和风险预警方面, 对河流型饮用水水源地选址的科学性和合理性却鲜有研究. 本文从河流型饮用水水源地健康、安全角度出发, 对法律制约、环境质量、水资源保障和环境风险影响因素进行统筹考虑, 利用层次分析法结合定量与定性分析, 建立河流型饮用水水源地选址的评价体系, 实现多源影响因子量化评估, 为保障饮用水安全提供技术支持.

收稿日期: 2010-07-26.

基金项目: 国家科技重大专项 (2009Z07631-002, 2009ZX07526-006); 国家环保“十二五”规划前期研究课题.

作者简介: 杜大仲 (1976—), 男, 博士研究生;

马放 (1963—), 男, 教授, 博士生导师.

1 层次分析法概述

1.1 基本原理

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP)^[3] 适用于对一些较为复杂、模糊及难以完全定量分析的问题的决策. 层次分析法是把复杂问题分解成各个组成因素, 将这些因素按支配关系分组形成递阶层次结构, 并通过两两比较的方式确定各个因素相对重要性, 然后综合决策者的判断. 它能够合理地把定性与定量的决策结合起来, 按照思维和心理的规律把决策过程层次化、数量化, 因其具有系统性、灵活性和实用性等特点现已被广泛地应用于环境、社会、经济等系统的决策分析之中^[4-5].

1.2 模型建立的步骤

运用层次分析法进行系统分析、设计、决策时可分为 4 个步骤进行;

1) 分析系统中各因素之间的关系, 建立系统的递阶层次结构. 应用 AHP 分析决策问题时, 首先要把问题条理化、层次化, 构造出一个有层次的结构模型. 在这个模型下, 复杂问题被分解为元素的组成部分. 这些元素又按其属性及关系形成若干层次. 上一层次的因素作为准则对下一层次有关元素起支配作用.

2) 对同一层次的各元素关于上一层中某一准则的重要性进行两两比较, 构造两两比较的判断矩阵

$$A = (a_{ij})_{n \times n}.$$

同层次元素的重要程度如何, 通常按 1~9 比例标度对重要性程度赋值, 表 1 中列出了 1~9 标度的含义. 其中 a_{ij} 就是元素 a_i 和 a_j 相对于准则层的重要性的比例标度. 判断矩阵 A 具有下列性质:

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1.$$

表 1 判断矩阵的比例标度及含义

标度	含义
1	表示两个元素相比, 具有同样重要性
3	表示两个元素相比, 前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比, 前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比, 前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 i 与 j 的重要性之比为 a_{ij} , 那么元素 j 与元素 i 重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

3) 由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重. 判断矩阵 A 对应于最大特征 $\lambda_{\max}$ 的

特征向量 W , 经归一化后即为一层次相应因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值, 这一过程称为层次单排序.

$$AW = \lambda_{\max} W.$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为 A 的最大特征根, W 为相应的特征向量, 所得到的 W 经归一化后就可作为权重向量.

4) 一致性检验.

① 计算一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}.$$

② 查找相应的平均随机一致性指标 RI , 表 2 所示为形成若干层次. 上一层次的因素作为准则对下一层次有关元素起支配作用.

表 2 平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

③ 计算一致性比例

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

当 $CR < 0.10$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当修正.

2 构建评价体系

2.1 法律制约 (B_1)

在饮用水水源的管理与保护过程中, 法律是环境保护行为的准则和依据, 是实施评价的基础. 《中华人民共和国水污染防治法》分别在五十七条、五十八条和五十九条中对水源地保护区内的项目和活动做出了相关规定. 因此, 在水源地选址时应首先考虑拟建水源地对区域内现存项目和活动的影响, 以免给后续的环境执法与管理工作带来隐患. 水源地保护区划分目的是减少一定区域内的污染物排放和减少水源的环境风险以保障饮用水源的饮用水卫生与安全, 保护区可分为一级保护区 (C_1) 和二级保护区 (C_2).

一级保护区内主要是保证饮用水卫生的要求; 二级保护区主要是在正常情况下满足水质要求, 在出现污染饮用水源的突发情况下, 保证有足够的采取紧急措施的时间和缓冲地带. 依据相关法律, 一级保护区的评价因子为排污口 (D_1)、与供水设施和保护水源无关的建设项目 (D_2)、网箱养殖区 (D_3) 和旅游区 (D_4); 二级保护区的评价因子为排污口 (D_5)、排放污染物的建设项目 (D_6)、网箱养殖区 (D_7)、旅游区 (D_8).

当拟建水源地的保护区存在上述评价因子且不可消除时, 评价因子将转换成为否决因子, 对饮

用水水源地选址方案进行直接否定。

2.2 环境质量 (B₂)

饮用水水源地的最终目标是向社会提供有“质量”保障的饮用水,其中环境类指标反映的是饮用水源的“质”。在环境类指标体系中一般污染性指标(C₃)反应的是水体总体的环境质量,毒性指标(C₄)则反应的是水质对人体健康的影响。

一般污染性指标体系中,日常监测的代表性评价因子为高锰酸盐指数(D₉)、氨氮(D₁₀)、总磷(D₁₁)和粪大肠菌群(D₁₂)。毒理性指标是依据《地表水环境质量标准》^[6]和《生活饮用水卫生标准》^[7]中污染物的筛选,以砷(D₁₃)、镉(D₁₄)、铬(6价)(D₁₅)、铅(D₁₆)、汞(D₁₇)作为评价因子。

2.3 水资源保障 (B₃)

水资源类指标反映的是饮用水源的“量”,在水资源指标体系中水量保障(C₅)反映的是目前水资源可利用的水量,取水工程对环境影响(C₆)反映的是水资源可持续利用的水量。

根据《建设项目水资源论证导则》^[8]水量保障指标体系中地表取水指标进行筛选,以水资源

状况(D₁₈)、水域开发利用程度(D₁₉)、生活取水量(D₂₀)作为评价因子。在环境影响中以对第三者取水影响(D₂₁)、对生态水量产生影响(D₂₂)、对水文变化有潜在影响(D₂₃)作为评价因子。

2.4 环境风险 (B₄)

环境风险具有突发性和不可预测性的特点,因河流具有污染物的迁移速度快、污染难于截留等特点,根据水源地环境风险事故产生的类别,环境风险源可分为固定源(C₇)和移动源(C₈)。依据近年来水源地污染事件的统计^[9],环境风险固定源选择拟建水源地上游的发酵企业(D₂₄)、化工企业(D₂₅)、造纸企业(D₂₆)作为评价因子,移动源选择拟建水源地保护区陆域范围内高速公路(D₂₇)和水域范围内航运通道(D₂₈)作为评价因子。

2.5 评价体系构建

依据层次分析法的原理,结合法律制约、环境质量、水资源保障和环境风险影响因素构建的河流型饮用水水源地选址评价体系见图 1。

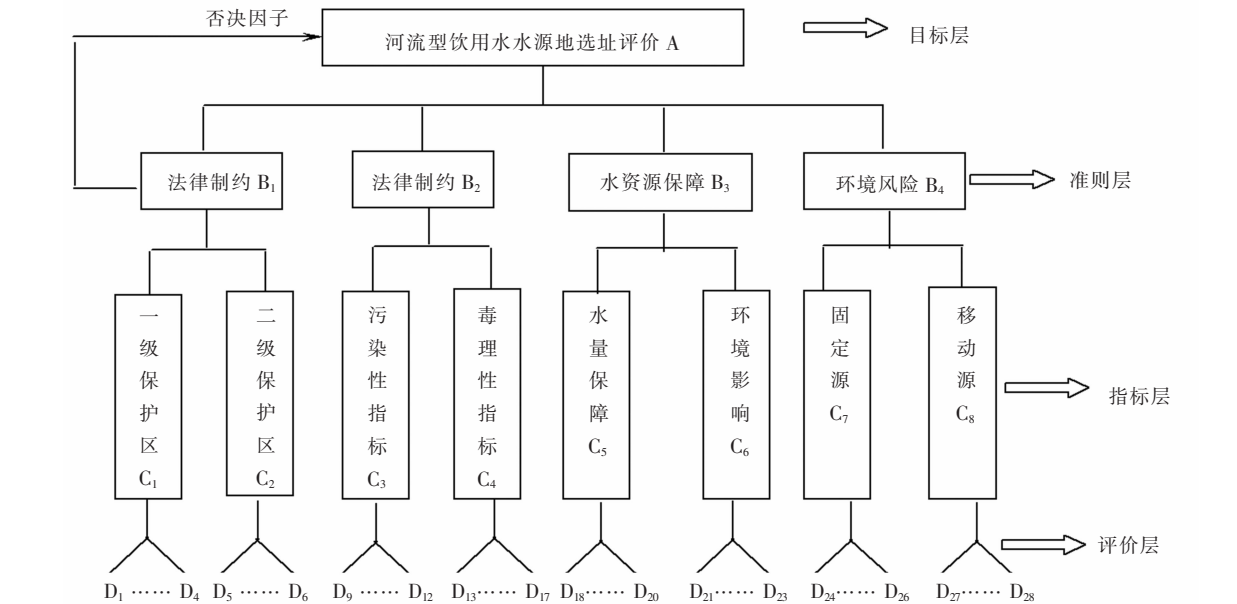


图 1 河流型饮用水水源地选址评价体系

3 评价模型

3.1 判断矩阵与权重

采用文献分析^[10]和专家问卷调查相结合的方法,分析各层的影响因子对应上一层准则层指标的影响程度建立判断矩阵,按照 AHP 建模步骤确定每层各影响因素的权重 W,并检验是否具有可接受的一致性,计算结果如表 3 ~ 15 所示。

表 3 准则层 B 对目标 A 的判断矩阵与权重

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W _i	CR
B ₁	1	3	3	5	0.520 5	0.016 2
B ₂	1/3	1	1	3	0.201 0	
B ₃	1/3	1	1	3	0.201 0	
B ₄	1/5	1/3	1/3	1	0.077 6	

表 4 指标层对准则 B ₁ 的判断矩阵与权重				
B ₁	C ₁	C ₂	W_i	CR
C ₁	1	5	0.833 3	0
C ₂	1/5	1	0.166 7	

表 5 指标层对准则 B ₂ 的判断矩阵与权重				
B ₂	C ₃	C ₄	W_i	CR
C ₃	1	5	0.100 0	0
C ₄	1/5	1	0.900 0	

表 6 指标层对准则 B ₃ 的判断矩阵与权重				
B ₃	C ₅	C ₆	W_i	CR
C ₅	1	3	0.750 0	0
C ₆	1/3	1	0.250 0	

表 7 指标层对准则 B ₄ 的判断矩阵与权重				
B ₄	C ₇	C ₈	W_i	CR
C ₇	1	1/3	0.25	0
C ₈	3	1	0.75	

表 8 评价层对指标 C ₁ 的判断矩阵与权重						
C ₁	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	W_i	CR
D ₁	1	1	1	1	0.250 0	0
D ₂	1	1	1	1	0.250 0	
D ₃	1	1	1	1	0.250 0	
D ₄	1	1	1	1	0.250 0	

表 9 评价层对指标 C ₂ 的判断矩阵与权重						
C ₂	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	W_i	CR
D ₅	1	5	5	7	0.615 2	0.077 5
D ₆	1/5	1	1	5	0.169 1	
D ₇	1/5	1	1	5	0.169 1	
D ₈	1/7	1/5	1/5	1	0.046 5	

表 10 评价层对指标 C ₃ 的判断矩阵与权重						
C ₃	D ₉	D ₁₀	D ₁₁	D ₁₂	W_i	CR
D ₉	1	6	6	8	0.670 4	0.031 1
D ₁₀	1/6	1	1	3	0.031 1	
D ₁₁	1/6	1	1	3	0.136 9	
D ₁₂	1/8	1/3	1/3	1	0.055 9	

表 11 评价层对指标 C ₄ 的判断矩阵与权重							
C ₄	D ₁₃	D ₁₄	D ₁₅	D ₁₆	D ₁₇	W_i	CR
D ₁₃	1	1	1	1	1	0.200 0	0
D ₁₄	1	1	1	1	1	0.200 0	
D ₁₅	1	1	1	1	1	0.200 0	
D ₁₆	1	1	1	1	1	0.200 0	
D ₁₇	1	1	1	1	1	0.200 0	

表 12 评价层对指标 C ₅ 的判断矩阵与权重					
C ₅	D ₁₈	D ₁₉	D ₂₀	W_i	CR
D ₁₈	1	3	7	0.649 1	0.062 4
D ₁₉	1/3	1	5	0.279 0	
D ₂₀	1/7	1/5	1	0.071 9	

表 13 评价层对指标 C ₆ 的判断矩阵与权重					
C ₆	D ₂₁	D ₂₂	D ₂₃	W_i	CR
D ₂₁	1	1/6	1/3	0.095 3	0.017 6
D ₂₂	6	1	3	0.654 8	
D ₂₃	3	1/3	1.0	0.249 9	

表 14 评价层对指标 C ₇ 的判断矩阵与权重					
C ₇	D ₂₄	D ₂₅	D ₂₆	W_i	CR
D ₂₄	1	5	7	0.730 6	0.062 4
D ₂₅	1/5	1	3	0.188 4	
D ₂₆	1/7	1/3	1	0.018 0	

表 15 评价层对指标 C ₈ 的判断矩阵与权重				
C ₈	D ₂₇	D ₂₈	W_i	CR
D ₂₇	1	3	0.750 0	0
D ₂₈	1/3	1	0.250 0	

依据表 3 ~ 15 的计算结果,自上而下地将单准则下的权重进行归一合成(A - D),并逐层进行总的判断一致性检验,对系统目标的合成权重见表 16,由表 16 中数据计算所得 $CR = 0.024 <$

0.1,说明合成权重具有良好的一致性.

3.2 评价标准

在评价过程中,将评价因子的评分等级划分为极不适宜、不适宜、适宜、比较适宜和极适宜 5 个等级,分别赋予 0、40、60、80、100 相应分值. 各评价因子依据现行法律法规、技术标准的相关等级要求,对应的分值如表 17 所示. 通过评分标准与权重的计算,水源地选址方案将得到最终分值. 60 分以下的选址方案应予以放弃,60 分以上的选址方案可作为考虑方案,分值越高方案的合理性越强.

表 16 目标层至评价层的合成权重(A-D)

目标层	准 则 层		指 标 层		评价层	
	准 则	权重	指 标	权重	评价因子	权重
河流型饮用水源地A	法律制约(B ₁)	0.520 5	一级保护区(C ₁)	0.433 7	排污口(D ₁)	0.108 4
					与供水设施和保护水源无关的建设项目(D ₂)	0.108 4
					网箱养殖区(D ₃)	0.108 4
					旅游区(D ₄)	0.108 4
			二级保护区(C ₂)	0.086 8	排污口(D ₅)	0.053 4
					排放污染物的建设项目(D ₆)	0.014 7
					网箱养殖区(D ₇)	0.014 7
					旅游区(D ₈)	0.004 0
	环境质量(B ₂)	0.201 0	污染性指标(C ₃)	0.020 1	高锰酸盐指数(D ₉)	0.013 5
					氨氮(D ₁₀)	0.027 5
					总磷(D ₁₁)	0.027 5
					粪大肠菌群(D ₁₂)	0.011 2
			毒理性指标(C ₄)	0.180 9	砷(D ₁₃)	0.036 2
					镉(D ₁₄)	0.036 2
					铬(六价)(D ₁₅)	0.036 2
					铅(D ₁₆)	0.036 2
	水资源保障(B ₃)	0.201 0	水量保障(C ₅)	0.150 8	汞(D ₁₇)	0.036 2
					水资源状况(D ₁₈)	0.096 8
					水域开发利用程度(D ₁₉)	0.042 0
			环境影响(C ₆)	0.050 2	生活取水量(D ₂₀)	0.010 8
					对第三者取水影响(D ₂₁)	0.004 8
					对生态水量产生影响(D ₂₂)	0.032 9
					对水文变化有潜在影响(D ₂₃)	0.012 5
					取水口上游的发酵企业(D ₂₄)	0.014 2
	环境风险(B ₄)	0.077 6	固定风险源(C ₇)	0.019 4	取水口上游的化工企业(D ₂₅)	0.003 7
					取水口上游的造纸企业(D ₂₆)	0.001 5
					陆域范围内高速公路(D ₂₇)	0.043 7
			移动风险源(C ₈)	0.058 2	水域范围内航运通道(D ₂₈)	0.014 5

表 17 评价因子的评分标准

评价因子	分值				
	0	40	60	80	100
一级保护区内排污口(D ₁)			存在,但可迁移		不存在
一级保护区内与供水设施和保护水源无关的建设项目(D ₂)			存在,但可拆除		不存在
一级保护区内网箱养殖(D ₃)			存在,但可迁移		不存在
一级保护区内旅游区(D ₄)			存在,但可关闭		不存在
二级保护区内排污口(D ₅)			存在,但可迁移		不存在
二级保护区内排放污染物的建设项目(D ₆)			存在,但可拆除		不存在
二级保护区内网箱养殖(D ₇)			存在,但可迁移		不存在
二级保护区内旅游区(D ₈)			存在,但可关闭		不存在
高锰酸盐指数(D ₉)/(mg·L ⁻¹)≤	15	10	6	4	2
氨氮(D ₁₀)/(mg·L ⁻¹)≤	2.0	1.5	1.0	0.5	0.15
总磷(D ₁₁)/(mg·L ⁻¹)≤	0.4	0.3	0.2	0.1	0.02
粪大肠菌群(D ₁₂)/L ⁻¹ ≤	40 000	20 000	10 000	2 000	200
砷(D ₁₃)/(mg·L ⁻¹)≤	0.1				0.05
镉(D ₁₄)/(mg·L ⁻¹)≤	0.1		0.05		0.001
铬(D ₁₅)/(mg·L ⁻¹)≤	0.1		0.05		0.01
铅(D ₁₆)/(mg·L ⁻¹)≤	0.1		0.05		0.01
汞(D ₁₇)/(mg·L ⁻¹)≤	0.001		0.000 1		0.000 05
水资源状况(D ₁₈)		紧缺	一般		充沛
水域开发利用程度(D ₁₉)/%		≥30	5~30		≤5
生活取水量(D ₂₀)/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)		≥15	5~15		≤1
对第三者取水影响(D ₂₁)	显著影响	一般影响	影响较小	基本无影响	无影响
对生态水量产生影响(D ₂₂)	显著影响	一般影响	影响较小	基本无影响	无影响
对水文变化有潜在影响(D ₂₃)	显著影响	一般影响	影响较小	基本无影响	无影响
取水口距上游发酵企业距离(D ₂₄)/km	≤5	5~85	85~175	175~520	≥520
取水口距上游化工企业距离(D ₂₅)/km	≤5	5~85	85~175	175~520	≥520
取水口距上游造纸企业距离(D ₂₆)/km	≤5	5~85	85~175	175~520	≥520
取水口距陆域范围内高速公路垂直距离(D ₂₇)/m	≤10	10~30	30~50	50~100	≥150
取水口距水域范围内航运通道垂直距离(D ₂₈)/m	≤10	10~30	30~50	50~100	≥150

4 结 语

应用层次分析方法基本原理建立河流型饮用水水源地选址评价体系与模型,较好地保证了权重系数的客观性和准确性,并用此模型对水源地选址进行科学评价,其结果可作为水源地选址参考依据;进行科学评价的重要前提是确定合理评价因子和评分标准,但目前评价指标仍没有统一的划分标准,还需经实证比较并在实践中完善.

参考文献:

[1] 国家环保部. 2009 年中国环境状况公报[EB/OL].
http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2009hjzkgb. 2010 -
06 - 03.

[2] 郑丙辉,付青,刘琰. 中国城市饮用水源地环境问题
与对策[J]. 环境保护, 2007, 371(10):59 - 61.

[3] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版
社,1988.

[4] SIMON U, BRUGGEMANN R, PUDENZ S. Aspects of

decision support in water management - example Berlin
and Potsdam (Germany) Spatially differentiated evalua-
tion [J]. Water Research, 2004,38(7):1809 - 1816.

[5] CAROLINE S K, SUZANNE J M H H, TEUNIS L.
Comparing uncertain alternatives for a possible airport is-
land location in the North Sea [J]. Ocean & Coastal
Management, 2003,46(11/12): 1031 - 1047.

[6] GB3838 - 2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京:国
家环境保护部,国家质量监督检验检疫总局,2002.

[7] GB5749 - 2006. 生活饮用水卫生标准[S]. 北京:国
家卫生部,2006.

[8] SL/Z322 - 2005. 建设项目水资源论证导则[S]. 北
京:国家水利部,2005.

[9] 张勇,王东宇,杨凯. 1985 - 2005 年中国城市水源地
突发污染事件不完全统计分析[J]. 安全与环境学
报, 2006, 6(2):79 - 84.

[10] 王秋莲,张震,刘伟. 天津市饮用水源地水环境健康
风险评价[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(5):187
- 190.

(编辑 刘 彤)