

大型水电工程复杂生态环境风险评价

徐选华, 曹 静

(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘 要 针对大型水电工程复杂生态环境风险的复杂性, 传统风险评价方法难以对大型水电工程建设带来的复杂风险进行客观评价. 基于重庆酉酬水电站案例以及国内外水电工程建设生态环境风险的相关文献, 提出了大型水电工程复杂生态环境风险关联因素及其量化维度结构. 在此基础上建立了生态环境风险关联度模型, 以此为基础通过聚类对复杂生态环境风险关联因素进行结构分析, 据此构造了风险关联因素的权重模型, 得出风险关联因素权重的排序结果. 最后利用重庆酉酬水电站工程调研资料进行实证分析, 为大型水电工程建设生态环境保护和维护提供借鉴.

关键词 水电工程; 复杂生态环境; 风险; 评价

Risk evaluation for complex ecological environment of large-scale hydropower engineering

XU Xuan-hua, CAO Jing

(School of Business, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract Aiming at the complexity for the complex ecological environment risks of large-scale hydropower engineering, it is difficult for the traditional methods of risk evaluation to objectively evaluate the complex risks that large-scale hydropower engineering brought to ecological environment. Based on the case of Chongqing Youchou hydropower station and the related at home and abroad literatures about the ecological environment risks of hydropower engineering construction, the structure of risk related-factors and their quantitative dimension of complex ecological environment of large-scale hydropower engineering is proposed. Then the risk related-degree model for ecological environment is constructed. Through clustering, the structure for risk related-factors of complex ecological environment is analyzed. The weight model of risk related-factors is constructed to obtain their ordering results. Finally, the investigation data from Chongqing Yuchu hydropower station is used to do empirical analysis, which provides the references for the ecological environmental protection and maintenance of large-scale hydropower engineering's construction.

Keywords hydropower engineering; complex ecological environment; risks; evaluation

1 引言

随着我国经济的发展, 产业结构的转型, 环境问题越来越受到重视, 环境友好和资源节约的两型社会成了新的发展目标. 水电工程作为关系到国计民生的基础产业, 其本质上不仅是社会经济工程, 更是生态工程. 水电工程的建设在给人类带来巨大经济利益的同时, 也给生态环境带来诸多风险. 由于大型水电工程建设规模庞大, 投资金额较多, 工程建设期较长, 涉及人员繁多, 而且水电工程多建设在风景秀丽的山川河流之中, 因而大型水电工程在建设全阶段中涉及的因素众多, 包括局地气候、水文、地质、动植物、经济社会环境等组成的复杂生态环境, 这些生态环境的变化极有可能引发地震、泥石流、崩塌等地质灾害, 威胁物种, 打乱库区居民的衣食住行, 带来种种显性和潜在风险. 然而这些风险因素之间又相互影响, 关系错综复杂, 这进一步

收稿日期: 2010-07-02

资助项目: 国家自然科学基金 (71171202, 70871121, 71171201); 国家创新研究群体科学基金 (70921001); 湖南省软科学基金 (2008ZK3038)

作者简介: 徐选华 (1962-), 男, 汉, 江西临川人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 决策理论与方法、管理信息系统与决策支持系统、工程管理、灾害管理等, E-mail: xuxh@mail.csu.edu.cn; 曹静 (1985-), 女, 辽宁铁岭人, 硕士研究生, 研究方向: 决策理论与方法、工程管理等.

加深了大型水电工程生态环境风险因素评价的复杂性。

由于工程生态环境风险的模糊性和不确定性,在其生态环境风险评价中较多地应用模糊综合评价法。于艳新^[1]运用该方法通过建立生态环境风险模糊指数对大庆地区油田开发排水工程的生态环境风险进行了评价,确知风险发生的可能性,并提出了优选方案环境风险管理的措施。层次分析和德尔菲法也是常用的生态环境风险评价方法,廖和平^[2]应用该方法评价了三峡工程巫山县移民安置区的土地生态安全等生态环境风险问题,李松真^[3]提出了 AHP—FUZZY 滑坡危险性评价模型,应用此模型对公路施工期的滑坡、土壤环境风险进行了评价,王华东^[4]应用层次分析法对南水北调中线水源工程中的生态环境风险进行识别,用模糊概率-事故树分析法估计风险概率,用统计分析法和类比分析法估计风险后果,最后用灰色关联分析法和综合指数法进行风险的综合评价,此法多用于较少的风险因素,且难以适应动态性因素的变化,当评价因素较多时,判断矩阵不一致现象将会增多,主观性较明显。此外灰色综合评价法也被采用,翟国静^[5]将灰色关联度分析应用于水资源工程生态环境影响评价之中,并进行了实证研究,该方法的特点是在“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性下对风险因素进行评价,与定性分析结论一致性较好,但在信息不完备的情况下,灰色综合评价法多适用于评价因素较少的问题。风险概率计算模型也得到很好的应用,徐平^[6]采用该模型评价了公路建设项目中河流环境的风险,并应用事故后果模型对公路交通事故所带来的生态环境风险进行了分析,该方法对工程生态环境风险的评价需要对风险源发生的概率和强度进行估计,这就使得计算结果有一定的主观性,而且随着评估因素的增多,此模型显然难以进行计算。另外刘玉洁^[7]对重庆巫山千丈岩梯级水电站建设后生态环境风险进行评价,根据《水利水电工程水文计算规范》等中的计算模式对生态环境中各个因子分别进行相应的评价。层次分析法在应用过程中多与模糊数学法、或灰色关联法结合进行评价。国外学者对于工程生态环境风险的评价方法也有较多研究,Refsgaard^[8]用一种整合了个体标准准则的整合模型来评价了多瑙河流域水电站建设对地表水、农业及洪水等生态环境的影响;ElSherbiny^[9]在工程建设活动和生态环境之间网络图表的基础上建立了生态环境风险评价模型,并用此对沿海油气工程带来的生态环境风险进行了评价,进而提出了对策;Scott^[10]用评估能力系统(SAC)中的风险模块对汉福德核预订工程的潜在生态环境风险进行了评价,对长期的核辐射风险进行了评估;Manful^[11]将语言描述和相关指标结合到纯数字的水文生态环境评价模型中,并用此模型对水电工程影响下濒临灭绝的河马的栖息地进行了生态环境风险实证分析。

综上所述,多数研究尚未对水电工程建设给复杂生态环境带来的多维风险进行关联性研究,大多停留在单一因素风险管理和评价阶段。本文将对面向大型水电工程所涉及到的复杂生态环境风险进行评价研究,首先建立大型水电工程复杂生态环境风险关联因素及其量化维度结构,其次建立生态环境风险关联度模型,然后通过聚类对复杂生态环境关联因素进行结构分析,构造风险关联因素权重模型得出风险关联因素权重的排序结果,最后利用重庆酉酬水电站工程案例进行实证分析。

2 大型水电工程复杂生态环境风险关联因素分析

水电工程由于建设的特殊性,其生态环境风险涉及复杂的关联因素,即工程建设全阶段中涉及到的与生态环境有关的风险对象,根据重庆酉酬水电站案例调研^[29],同时查阅国内外水电工程建设相关文献[12-26],再依据系统论的方法将水电工程生态环境风险看成一个复杂系统,将其分解成自然环境子系统、生态环境子系统、社会经济子系统和工程主体子系统,然后对这四个子系统分别进行层层分解,最后总结出大型水电工程复杂生态环境风险关联因素,这样先划分系统,再根据系统层层分解的方法可以保证评价体系的科学性和评价指标的全面性,也有利于对风险关联因素进行评价。具体系统分层如表 1 所示。

根据上述表 1 总结的风险关联因素结构,再结合文献[12-26]和重庆酉酬水电站建设现场实际,分别得出其量化维度(相当于风险关联因素的属性)如表 2 所示。

3 大型水电工程生态环境风险关联度模型

针对大型水电工程生态环境风险关联因素的复杂性和规模性等特点,将复杂生态环境的风险关联因素看成一个群体 Ω ,其中包含 t 个关联因素,关联因素的量化维度反映了大型水电工程的建设给生态环境关联因素所带来的风险维度,其中量化维度的风险值可根据水电工程建成后的生态环境历史水文资料实际情况进行赋值。由于每两个风险关联因素的量化维度的数量、数值和属性不完全相同,所以反映的风险维度也不完全

相同, 为了较全面地反映大型水电工程的建设对生态环境关联因素的影响, 下面对两个风险关联因素的风险矢量分别进行定义.

表 1 大型水电站工程复杂生态环境风险评价体系结构

系统名称	风险属性名称	风险关联因素集
自然环境子系统	水环境	水文泥沙, 径流水, 河流形态, 水质, 底质
	地表环境	局地气候, 土壤营养物质, 地质, 水土流失, 地震, 土壤盐碱化, 土壤沼泽化, 滑坡, 泥石流
生态环境子系统	陆生生物	陆生植物, 陆生动物
	水生生物	水生植物, 鱼类, 浮游植物, 浮游动物, 微生物
社会经济子系统	库区移民	库区移民安置风险, 库区移民健康风险, 库区社会稳定风险
	当地经济发展	地区工业, 地区农业, 交通建设, 库区景观, 地区经济风险
工程主体子系统		施工风险

表 2 大型水电站工程复杂生态环境风险关联因素及其量化维度

编号	生态环境 风险关联因素	量化维度
1	水文泥沙风险	平均输沙量; 泥沙颗粒含量; 有机质含量; 全氮; 全磷; 全钾
2	径流水风险	地表径流量; 水温; 地下水水位; 径流水总悬浮物含量; PH 值; 总氮; 总磷; 总钾
3	河流形态风险	河床下切深度; 断面宽度扩展; 河床坡度
4	水质风险	水温; PH 值; 氨氧; 生物耗氧量; 硅酸盐; 溶解氧; 总硬度; 铵氮; 总氮; 总磷
5	局地气候	气温; 空气湿度; 平均风速; 降雨量; 蒸发量; 无霜期; 日照时数
6	土壤营养物质风险	全氮; 全磷; 全钾; 土壤速效磷含量; 土壤速效钾含量; 有机质含量
7	地质风险	有机质含量; 农田 Eh 值; 土壤 PH 值; 土壤容重; 岩石硬度
8	水土流失风险	山坡坡度; 降雨量; 植被覆盖率; 水土流失率
9	地震风险	土壤容重; 库水荷重; 库区渗漏量; 岩石硬度
10	土壤盐碱化风险	土壤 PH 值; 地下水水位; 气温
11	土壤沼泽化风险	20cm-45cm 深度土壤含水量; 有机质含量; 地下水水位
12	滑坡风险	山坡坡度; 降雨量
13	泥石流风险	20cm-45cm 深度土壤含水量; 山坡坡度; 降雨量; 岩石破碎分割程度
14	底质风险	农田 Eh 值; 土壤 PH 值; 总氮; 总磷; 有机质含量
15	陆生植物风险	植被覆盖率; 自然生产力; 库区建房人均用材量; 野生植物数量; 珍稀植物种类
16	陆生动物风险	种群密度; 野生动物数量; 珍稀动物数量
17	水生植物风险	水生植被覆盖率; 水位; 水温; 自然生产力; 水生植物数量
18	鱼类风险	水位; 水温; 鱼道流速; 鱼道尺寸; 鱼类数量
19	浮游植物风险	水位; 水温; 群落种类; 密度
20	浮游动物风险	水位; 水温; 群落种类; 密度; 生物量
21	微生物风险	水位; 水温; 微生物种类; 种群密度
22	库区移民安置风险	人均居住面积; 坡度; 植被覆盖率; 日照时数; 降雨量; 耕种层厚度
23	库区移民健康风险	自然疫源疾病发病率; 地区病发病率; 介水传染病发病率; 废水排放量; 废渣排放量; 人均拥有病床数
24	地区农业风险	农业总产值; 人均耕地面积; 降雨量; 日照时数; 耕种层厚度; 人均有效灌溉面积; 农民人均纯收入; 农业机械总动力; 农业从业人数
25	地区工业风险	工业总产值; 产品销售率; 工业利润总额; 工业从业人数; 废水排放量; 废渣排放量
26	库区社会稳定风险	移民人口数量; 人均居住面积; 人均供水量; 人均耗电量; 失业率
27	地区经济风险	财政收入; 财政支出; 农业总产值; 工业总产值; 人均纯收入; 恩格尔系数
28	库区景观风险	淹没区房屋面积; 淹没耕地面积; 施工区占地影响耕地面积
29	交通建设风险	占用土地面积; 公路运量; 坡度改变程度; 径流水总悬浮物含量
30	施工风险	平均施工人数; 植被覆盖率; 施工临时房屋面积; 施工占用耕地; 施工环境保护费用; 库区淹没处理费用; 移民安置费用; 废水排放量; 废渣排放量

定义 1 风险矢量. 设第 i 个风险关联因素的量化维度为 n , 其中第 l 个量化维度在大型水电工程建设影响下的风险值为 v_l^i , 并且 $v_l^i \geq 0, l=1, 2, \dots, n$, 则称风险值矢量 $V^i=(v_1^i, v_2^i, \dots, v_n^i)$ 为第 i 个风险关联因

素的风险值矢量; 设第 j 个风险关联因素的量化维度为 m , 其中第 k 个量化维度在大型水电工程建设影响下的风险值为 v_k^j , 并且 $v_k^j \geq 0, k=1, 2, \dots, m$, 则称风险值矢量 $V^j=(v_1^j, v_2^j, \dots, v_m^j)$ 为第 j 个风险关联因素的风险值矢量。

在水电工程建设之前, 当地的复杂生态环境维持平衡, 这些风险关联因素中的量化维度都对应一个初始值, 将这些初始值看成关联因素量化维度的标准值, 这些初始值在案例分析时根据水电工程建成前对应的生态环境历史实际情况进行赋值。下面对风险关联因素的风险标准值矢量进行定义。

定义 2 风险标准值矢量. 设第 i 个风险关联因素中第 l 个量化维度的风险标准值为 v_{lo}^i , 并且 $v_{lo}^i \geq 0, l=1, 2, \dots, n$, 则称 $V_o^i = (v_{1o}^i, v_{2o}^i, \dots, v_{no}^i)$ 为第 i 个风险关联因素的风险标准值矢量。

大型水电工程复杂生态环境的风险关联因素之间存在着一定的耦合关系, 彼此相互作用和影响, 某个关联因素的属性 (或量化维度) 值的变化可能会引起诸多其它关联因素属性值的变化, 这也正是水电工程所造成的风险程度难以测度的重要原因。由于各个风险关联因素量化维度间有一定的差异性, 其相互间的影响不具有可比性, 考虑到风险关联因素的量化维度在大型水电工程对复杂生态环境的影响下都有所变化, 在上述风险值矢量和风险标准值矢量的基础上引入风险变化值矢量, 用量化维度间的变化值矢量来衡量风险关联因素相互间的影响程度。

定义 3 风险变化值矢量. 两个风险关联因素的量化维度风险值分别为 v_l^i 和 v_k^j , 风险标准值为 v_{lo}^i 和 v_{ko}^j , 设第 i 个风险关联因素中第 l 个量化维度的变化值为 p_l^i , 第 j 个风险关联因素中第 k 个量化维度的变化值为 p_k^j , 则 $P^i = (p_1^i, p_2^i, \dots, p_n^i), P^j = (p_1^j, p_2^j, \dots, p_m^j)$ 分别为第 i 个和第 j 个风险关联因素的风险变化值矢量, 其中 $p_l^i = \frac{|v_l^i - v_{lo}^i|}{v_{lo}^i}, p_k^j = \frac{|v_k^j - v_{ko}^j|}{v_{ko}^j}, l=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m$ 。

在同一个水电工程建设项目的生态环境系统中, 风险关联因素对同一环境有着相似或相异的适宜性, 风险关联因素量化维度之间的这一特征与森林景观学中的适宜性机制有相似性, 本文引用森林景观学中的单因子耦合度, 将第 i 个风险关联因素中第 l 个量化维度与第 j 个风险关联因素中第 k 个量化维度之间的风险影响度定义为 $b_{lk}^{ij} = \frac{\min(p_l^i, p_k^j)}{\max(p_l^i, p_k^j)}$ [27], $0 \leq b_{lk}^{ij} \leq 1$, 此时风险关联因素量化维度变化值差距越大, 量化维度之间的风险影响度值越小, 说明在水电工程建设对复杂生态环境影响过程之中风险关联因素之间的风险相互影响越小, 影响程度值与对应的描述如表 3 所示。

表 3 风险关联因素量化维度风险影响程度及其相应描述

度值	风险影响程度	风险影响描述
0	无影响	两个量化维度风险值间的改变完全不会引起对方风险值的改变。
0.2	微弱影响	两个量化维度风险值之间的相互影响是微弱的, 是一种不易察觉的改变。
0.4	轻度影响	一个量化维度风险值的改变能够较明显的影响另一量化维度风险值的改变。
0.6	中度影响	一个量化维度风险值的改变能较大程度的影响另一量化维度风险值的改变。
0.8	重度影响	一个量化维度风险值的改变能极大程度的影响另一量化维度风险值的改变。
1.0	完全影响	两个量化维度风险值的改变完全同步, 或者两个量化维度完全相同。

第 i 个风险关联因素与第 j 个风险关联因素之间的量化维度影响关系矩阵 $B_{n \times m}^{ij}$ 由风险影响度 b_{lk}^{ij} 构成, 即有下式:

$$B_{n \times m}^{ij} = \begin{bmatrix} b_{11}^{ij} & b_{12}^{ij} & \cdots & b_{1m}^{ij} \\ b_{21}^{ij} & b_{22}^{ij} & \cdots & b_{2m}^{ij} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1}^{ij} & b_{n2}^{ij} & \cdots & b_{nm}^{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 n 和 m 分别为第 i 个和第 j 个风险关联因素中的量化维度个数。

在群决策问题属性个数为常数的情况下, 文献 [28] 中的相关度模型可有效地衡量群体中两个决策成员偏好的相关度。将此模型引入到本文的风险关联度建模中, 风险关联因素对应于成员的偏好, 量化维度对应于属性, 但由于风险关联因素的量化维度不是常数, 即不同风险关联因素的量化维度个数是不同的, 因此就需要将文献 [28] 中的相关度模型推广到量化维度不同的情形, 现将量化维度影响关系矩阵 $B_{n \times m}^{ij}$ 引入其中, 可解决各个风险因素因量化维度不同而无法比较的问题, 定义如下。

定义 4 两个风险关联因素风险矢量 V^i 和 V^j 之间的风险关联度模型为

$$r_{ij}(V^i, V^j) = \frac{(|V^i - V_o^i|^i) \cdot B \cdot |V^j - V_o^j|^T}{\|V^i - V_o^i\|_2 \cdot \|B\|_2 \cdot \|V^j - V_o^j\|_2} \quad (2)$$

式中 $r_{ij}(V^i, V^j)$ 为风险关联度, V_o^i 、 V_o^j 为第 i 个和第 j 个风险关联因素的风险标准矢量。

性质 1 在以上定义的基础上, 对于风险关联因素群体 Ω 中的两个风险矢量 V^i 和 V^j 之间的风险关联度 $r_{ij}(V^i, V^j)$, 有不等式: $0 \leq r_{ij}(V^i, V^j) \leq 1$ 。

证明 对任意实数 $a \geq 0, b \geq 0$, 都有 $a \cdot b \leq \frac{a^2}{2} + \frac{b^2}{2}$ 。记 $\xi_l^i = v_l^i - v_{l_0}^i, \eta_k^j = v_k^j - v_{k_0}^j, l = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$ 。当 $\xi_l^i = b_{lk}^{ij} = \eta_k^j = 0$ 时, 结论显然成立, 下设 ξ_l^i, b_{lk}^{ij} 和 η_k^j 不全部为 0, 于是得:

$$\begin{aligned} & \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n |\xi_l^i| \cdot |b_{lk}^{ij}| \cdot |\eta_k^j|}{\sqrt{\sum_{l=1}^n |\xi_l^i|^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n |b_{lk}^{ij}|^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^m |\eta_k^j|^2}} \\ &= \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \left[\frac{|\xi_l^i| \cdot |\eta_k^j|}{\sqrt{\sum_{l=1}^n |\xi_l^i|^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^m |\eta_k^j|^2}} \right] \cdot \left[\frac{|b_{lk}^{ij}|}{\sqrt{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n |b_{lk}^{ij}|^2}} \right] \\ &\leq \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{|\xi_l^i|^2 \cdot |\eta_k^j|^2}{\sum_{l=1}^n |\xi_l^i|^2 \cdot \sum_{k=1}^m |\eta_k^j|^2} \right] + \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \left[\frac{|b_{lk}^{ij}|^2}{2 \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n |b_{lk}^{ij}|^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \left[\frac{|\xi_l^i|^2}{\sum_{l=1}^n |\xi_l^i|^2} \right] \cdot \left[\frac{|\eta_k^j|^2}{\sum_{k=1}^m |\eta_k^j|^2} \right] + \frac{1}{2} \\ &\leq \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{|\xi_l^i|^2 \cdot |\eta_k^j|^2}{\sum_{l=1}^n |\xi_l^i|^2 \cdot \sum_{k=1}^m |\eta_k^j|^2} \right] + \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \left[\frac{|b_{lk}^{ij}|^2}{2 \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n |b_{lk}^{ij}|^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \left[\frac{|\xi_l^i|^2}{\sum_{l=1}^n |\xi_l^i|^2} \right] \cdot \left[\frac{|\eta_k^j|^2}{\sum_{k=1}^m |\eta_k^j|^2} \right] + \frac{1}{2} \\ &\leq \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \left[\frac{|\xi_l^i|^4}{2 \cdot \sum_{l=1}^n |\xi_l^i|^4} + \frac{|\eta_k^j|^4}{2 \cdot \sum_{k=1}^m |\eta_k^j|^4} \right] + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1, \end{aligned}$$

将 ξ_l^i 和 η_k^j 代入式 (2) 中可得结论。

4 大型水电工程生态环境风险评价

由于大型水电工程生态环境的风险关联因素众多, 并且其包含的量化维度数量及性质存在差异等特点, 不同关联因素造成的风险影响程度不尽相同, 有些关联因素造成的风险影响程度可能较接近, 为了深入反映所有这些关联因素风险影响程度, 需要对这些关联因素的风险结构进行分析。由于风险关联因素的规模性, 本文采用聚类方法, 将这些关联因素进行聚类, 利用形成的聚类结构来反映所有关联因素的风险影响, 进一步形成生态环境评价结果。

4.1 风险关联因素风险结构分析

基于 (2) 的生态环境风险关联度 $r_{ij}(V^i, V^j)$, 对风险关联因素群体 Ω 进行聚类^[28], 可以形成 p 个关联因素聚集 $\Omega = \{C^1, C^2, \dots, C^p\}$ 。设 s_i 为第 i 个聚集 C^i 所包含的风险关联因素的个数, 于是有 $\sum_{i=1}^p s_i = t$ 。聚集 $C^i (i=1, 2, \dots, p)$ 的综合风险矢量 $V^i = \{v_z^i | v_z^i \in V_l^i\}$, 其中 $l=1, 2, \dots, s_i, V_l^i$ 为第 i 个聚集 C^i 中第

l 个风险关联因素的风险矢量, v_z^i 为第 i 个聚集 C^i 中所包含的风险矢量的量化维度, 即第 i 个聚集 C^i 的综合风险矢量的量化维度为该聚集中所包含的所有风险矢量的量化维度 (去除风险矢量中重复的量化维度), 这样聚集 C^i 的综合风险矢量的量化维度数量为该聚集中所包含的风险矢量的不重复的量化维度数量之和.

4.2 风险关联因素权重模型

设第 i 个聚集 C^i 的综合风险矢量为 \bar{V}^i , 第 j 个聚集 C^j 的综合风险矢量为 \bar{V}^j , 则这两个聚集的风险关联度记为 $R_{ij}(\bar{V}^i, \bar{V}^j)$, 聚集 C^i 的权重记为 $W_i (i=1, 2, \dots, p)$.

利用上述 (1) 式确定的量化维度影响关系矩阵 B 的方法来确定两个综合风险矢量的量化维度影响关系矩阵, 然后分别计算出 p 个聚集中两个聚集 C^i 和 C^j 的风险关联度 R_{ij} , 并且 $R_{ij} = R_{ji}$. 于是聚集 C^i 的权重 W_i 可用下式确定:

$$W_i = R_{ii} / \sum_{j=1}^p R_{ij}, \quad \text{对该聚集的权重进行归一化得 } W_i = W_i / \sum_{r=1}^p W_r \quad (3)$$

分别计算出第 i 个聚集 C^i 中第 l 个风险关联因素与第 k 个风险关联因素间的风险关联度 r_{lk}^i , 其中 $l, k=1, 2, \dots, s_i$, 并且 $r_{lk}^i = r_{kl}^i$. 于是聚集 C^i 的中第 l 个风险关联因素与第 k 个风险关联因素间的风险关联度 r_{lk}^i , 其中 $l, k=1, 2, \dots, s_i$, 并且 $r_{lk}^i = r_{kl}^i$. 于是聚集 C^i 的中第 l 个风险关联因素权重 G_l^i 可用下式确定:

$$G_l^i = r_{ll}^i / \sum_{k=1}^{s_i} r_{lk}^i, \quad \text{对该风险关联因素的权重进行归一化得 } G_l^i = G_l^i / \sum_{l=1}^{s_i} G_l^i \quad (4)$$

综合聚集的权重和聚集中各个风险关联因素的权重得出风险关联因素的综合权重 H_l^i , 为

$$H_l^i = W_i \cdot G_l^i \quad (5)$$

其中 $i=1, 2, \dots, p; l=1, 2, \dots, s_i$, 此时 $\sum_{i=1}^p \sum_{l=1}^{s_i} H_l^i = 1$.

据此可以将风险关联因素的综合权重进行排序, 综合权重的大小说明了对应的风险因素对其它风险因素产生的影响, 即产生的风险综合权重大小直接反映了在大型水电工程中对应的生态环境风险关联因素影响下的风险大小, 所以较大综合权重的风险关联因素应作为大型水电工程建设中对生态环境影响的重点关注的对象.

5 实例分析

本文针对重庆酉酬水电站工程进行实例分析, 该工程虽为当地经济发展提供了强劲的电力支撑, 也对地区经济发展起到良好的拉动作用, 但其对生态环境的影响是不可忽视的, 如果处理不当, 将产生无法预计的后果.

通过对酉酬水电站的跟踪调查, 积累了大量的珍贵历史数据, 并参考 2006 年至 2009 年重庆市统计年鉴、中国水利年鉴以及中国科学院三峡工程生态与环境科研项目中的相关数据等, 根据表 1 中的大型水电站工程复杂生态环境风险关联因素, 对酉酬水电工程建成前后的风险关联因素量化维度的标准值和风险值进行选取, 标准值来源于 2006 年酉酬水电工程建成前的相关历史数据, 风险值来源于 2008–2009 年工程建成后的实际数据, 共 155 个量化维度. 与表 1 相对应的量化维度的风险标准值 (隐去计量单位) 和风险值以及根据定义 3 计算的风险变化值如表 4 所示.

基于风险关联度模型 (2), 采用文献 [28] 的聚类方法对表 1 的风险关联因素群体 Ω 进行聚类. 聚类阈值 $\gamma^{[28]}$ 越大, 形成的聚集数越多, 通过抽取 30 个风险关联因素中的部分因素进行两两关联度计算, 发现关联度在 0.4 以上的值占样本的 15% 左右, 为保证聚类的合理性和准确性, 选取聚类阈值 $\gamma=0.4$, 使较大的风险关联因素集能够合理准确的被划分为较小和较易评价的风险关联因素集合再进行综合风险评价. 此时 30 个风险关联因素被聚类成为 15 个聚集, 如表 5 所示.

在风险关联因素聚类结果的基础上, 确定各个风险关联因素聚集的量化维度, 每个聚集的量化维度由该聚集中各个成员的量化维度组成, 用风险关联度模型来计算 15 个聚集间的风险关联度 $R_{ij}(\bar{V}^i, \bar{V}^j)$, 其中 \bar{V}^i 和 \bar{V}^j 分别为聚集 C^i 和 C^j 的综合风险矢量, 根据 (3) 式计算聚集 C^i 的权重 W_i , 15 个聚集的权重如表 6 所示.

再根据聚集中风险关联因素权重模型 (4) 和风险关联因素的综合权重模型 (5), 在表 5 聚集权重的基础上可以得出酉酬水电站工程复杂生态环境所有风险关联因素的综合权重值, 如表 7 所示. 如果某聚集只包括

1 个风险关联因素, 则其权重值为 1, 所以只对包括大于 1 个风险关联因素的聚集计算其中的风险关联因素的权重.

于是可得大型水电工程生态环境风险关联因素综合权重如表 8 所示.

由表 8 得出: 大型水电工程生态环境风险关联因素综合权重值由大到小依次为陆生植物风险、滑坡风险、陆生动物风险、水土流失风险、水质风险、局地气候风险、地区农业风险、交通建设风险、库区移民健康风险、泥石流风险、地区工业风险、地质风险、地震风险、水生植物风险、地区经济风险、河流形态风险、土壤盐碱化风险、库区社会稳定风险、施工风险、微生物风险、底质风险、库区景观风险、径流水风险、土壤营养物质风险、水文泥沙风险、浮游动物风险、鱼类风险、浮游植物风险、土壤沼泽化风险、库区移民安置风险.

表 4 西酬水电工程建成前后的风险关联因素量化维度的风险标准值、风险值和风险变化值

V_{io}^i	量化维度值 (v_{io}^i, v_i^i, p_i^i)
v_i^1	(72.8, 138, 0.896); (0.297, 0.343, 0.155); (2.96, 1.4, 0.48); (0.15, 0.12, 0.2); (0.45, 0.34, 0.244); (0.9, 0.71, 0.211)
v_i^2	(25.33, 46.71, 0.844); (15.78, 16.18, 0.025); (16.3, 19, 0.166); (0.24, 0.31, 0.292); (8.7, 8.8, 0.011); (0.21, 0.12, 0.429); (0.10, 0.05, 0.5); (8.45, 4.81, 0.431)
v_i^3	(1.3, 2, 0.538); (3.2, 5.6, 0.75); (0.754, 0.837, 0.11)
v_i^4	(15.78, 16.18, 0.025); (8.7, 8.8, 0.011); (0.1, 0.12, 0.2); (3.76, 3.85, 0.024); (6.0, 5.4, 0.1); (8.21, 8.21, 0); (1.32, 1.33, 0.008); (0.045, 0.043, 0.044); (0.2, 0.15, 0.25); (0.10, 0.05, 0.5)
v_i^5	(18.1, 18.6, 0.028); (79, 82, 0.038); (1.3, 1.69, 0.3); (1151.2, 1157.2, 0.005); (1489.6, 1325.7, 0.11); (270, 261, 0.033); (1234.8, 1495.7, 0.211)
v_i^6	(0.15, 0.12, 0.2); (0.45, 0.34, 0.244); (3.23, 1.84, 0.431); (3.5, 2.34, 0.331); (79, 55, 0.304); (2, 1.4, 0.3)
v_i^7	(2, 1.4, 0.3); (279, 151, 0.459); (8.1, 8.6, 0.062); (0.97, 1.12, 0.155); (0.30, 0.30, 0)
v_i^8	(25, 23.7, 0.052); (1151.2, 1157.2, 0.005); (32, 21, 0.344); (35, 42.30, 0.209)
v_i^9	(0.97, 1.12, 0.155); (1, 1.52, 0.52); (1, 1.77, 0.77); (0.30, 0.34, 0.133)
v_i^{10}	(5.5, 5.4, 0.018); (16.3, 19, 0.166); (18.1, 18.6, 0.028)
v_i^{11}	(9.60, 10.70, 0.115); (2, 1.40, 0.3); (16.3, 19, 0.166)
v_i^{12}	(25, 23.7, 0.052); (1151.2, 1157.2, 0.005)
v_i^{13}	(9.60, 10.70, 0.115); (25, 23.7, 0.052); (1151.2, 1157.2, 0.005); (25, 11, 0.56)
v_i^{14}	(504, 151, 0.7); (5.5, 5.4, 0.018); (0.2, 0.281, 0.405); (0.10, 0.05, 0.5); (2, 1.4, 0.3)
v_i^{15}	(32, 21, 0.344); (4.37, 2.63, 0.398); (26078, 166110, 5.37); (42, 40, 0.048); (3, 2, 0.333)
v_i^{16}	(39.20, 35.11, 0.104); (363, 354, 0.025); (32, 30, 0.063)
v_i^{17}	(31, 20, 0.355); (445.14, 335, 0.247); (15.78, 16.18, 0.025); (2.51, 2.13, 0.151); (37, 31, 0.162)
v_i^{18}	(445.14, 335, 0.247); (15.78, 16.18, 0.025); (1.89, 0.445, 0.765); (3.0, 1.5, 0.5); (41, 36, 0.122)
v_i^{19}	(445.14, 335, 0.247); (15.78, 16.18, 0.025); (80, 75, 0.063); (7.1, 5.2, 0.268)
v_i^{20}	(445.14, 335, 0.247); (15.78, 16.18, 0.025); (70, 68, 0.029); (435, 367, 0.156); (6.72, 4.88, 0.274)
v_i^{21}	(445.14, 335, 0.247); (15.78, 16.18, 0.025); (491, 473, 0.037); (23.40, 21.40, 0.085)
v_i^{22}	(38.6, 31.2, 0.192); (15, 15, 0); (32, 34, 0.063); (1234.8, 1495.7, 0.211); (1151.2, 1157.2, 0.005); (13.5, 12.4, 0.081)
v_i^{23}	(2.10, 3.73, 0.776); (20, 23.50, 0.175); (165.17, 266.46, 0.613); (272, 522.92, 0.923); (5000, 5328.4, 0.066); (25.20, 23.92, 0.051)
V_i^{24}	(14.60, 18.34, 0.253); (1.79, 2.24, 0.251); (1151.2, 1157.2, 0.005); (1234.8, 1495.7, 0.211); (13.5, 12.4, 0.081); (0.290, 0.303, 0.045); (2031, 2778, 0.368); (36.5, 37.6, 0.03); (29.36, 29.93, 0.019)
v_i^{25}	(10.3, 19.1, 0.854); (99.30, 96.70, 0.026); (0.10, 0.19, 0.9); (1.89, 1.93, 0.021); (272, 522.92, 0.923); (5000, 5328.4, 0.066)
v_i^{26}	(4000, 4635, 0.16); (38.6, 31.2, 0.192); (254, 302, 0.189); (180, 267, 0.483); (4.20, 4.10, 0.024)
v_i^{27}	(1.89, 3.74, 0.979); (7.91, 14.21, 0.796); (14.60, 18.34, 0.256); (10.08, 19.10, 0.895); (4555, 6079, 0.335); (50.00, 51.30, 0.026)
v_i^{28}	(0, 17.9, 1); (0, 5386.29, 1); (0, 348.05, 1)
v_i^{29}	(0, 6890.69, 1); (0, 22.6, 1); (0, 1.5, 1); (0.24, 0.31, 0.292)
v_i^{30}	(0, 2000, 1); (32, 34, 0.063); (0, 19660, 1); (0, 348.05, 1); (0, 5345.59, 1); (0, 13335.41, 1); (0, 4582.85, 1); (272, 522.92, 0.923); (5000, 5328.4, 0.066)

表 5 酉酬水电站工程复杂生态环境风险关联因素聚类结果

聚集 C^i	风险关联因素	
C^1	V^1, V^3, V^{28}	水文泥沙风险, 河流形态风险, 库区景观风险
C^2	V^2, V^9, V^{30}	径流水风险, 地震风险, 施工风险
C^3	V^4	水质风险
C^4	V^5	局地气候风险
C^5	V^6, V^{10}, V^{21}	土壤营养物质风险, 土壤盐碱化风险, 微生物风险
C^6	V^7, V^{13}	地质风险, 泥石流风险
C^7	V^8, V^{12}	水土流失风险, 滑坡风险
C^8	$V^{11}, V^{18}, V^{19}, V^{20}, V^{22}$	土壤沼泽化风险, 鱼类风险, 浮游植物风险, 库区移民安置风险, 浮游动物风险
C^9	V^{14}, V^{26}	底质风险, 库区社会稳定风险
C^{10}	V^{15}	陆生植物风险
C^{11}	V^{16}	陆生动物风险
C^{12}	V^{17}, V^{27}	水生植物风险, 地区经济风险
C^{13}	V^{23}, V^{25}	库区移民健康风险, 地区工业风险
C^{14}	V^{24}	地区农业风险
C^{15}	V^{29}	交通建设风险

表 6 生态环境风险关联因素聚集权重

聚集 C^i	权重 W_i	聚集 C^k	权重 W_i	聚集 C^k	权重 W_i	聚集 C^k	权重 W_i	聚集 C^k	权重 W_i
C^1	0.037	C^4	0.056	C^7	0.219	C^{10}	0.133	C^{13}	0.051
C^2	0.048	C^5	0.041	C^8	0.022	C^{11}	0.121	C^{14}	0.048
C^3	0.070	C^6	0.048	C^9	0.029	C^{12}	0.037	C^{15}	0.042

表 7 生态环境风险关联因素权重

聚集 C^i	风险关联因素	风险关联因素权重 G_i^i	综合权重 H_i^i	聚集 C^i	风险关联因素	风险关联因素权重 G_i^i	综合权重 H_i^i
C^1	V^1	0.234775	0.008775	C^8	V^{11}	0.1789	0.00386
	V^3	0.473044	0.01768		V^{18}	0.206666	0.004459
	V^{28}	0.292181	0.010921		V^{19}	0.203406	0.004389
C^2	V^2	0.223711	0.010723	V^{20}	0.232768	0.005022	
	V^9	0.451677	0.021651	V^{22}	0.17826	0.003846	
	V^{30}	0.324612	0.01556	C^9	V^{14}	0.453897	0.012995
C^5	V^6	0.225502	0.009149		V^{26}	0.546103	0.015634
	V^{10}	0.412499	0.016736	C^{12}	V^{17}	0.518871	0.019339
	V^{21}	0.361999	0.014687		V^{27}	0.481129	0.017932
C^6	V^7	0.459592	0.022212	C^{13}	V^{23}	0.532937	0.026973
	V^{13}	0.540408	0.026117		V^{25}	0.467063	0.023639
C^7	V^8	0.437782	0.095665				
	V^{12}	0.562218	0.122857				

大型水电工程的建设给生态环境带来不同程度的风险, 风险关联因素权重值越大, 说明工程的建设对生态环境风险影响程度越大. 由此可知, 重庆酉酬水电工程的建设对陆生植物、滑坡的形成以及陆生动物带来较大的风险影响, 而对库区移民安置带来的风险影响相对较小. 水电站建设的生态环境保护中参照风险关联因素的权重值大小有重点的进行保护和维持, 力争风险损失最小化. 与此同时该评价结果也为其它水电站建设的生态环境保护提供借鉴.

表 8 大型水电工程生态环境风险关联因素综合权重表

风险 关联 因素	水文 泥沙 风险	径流 水风 险	河流形 态风险	水质 风险	局地 气候 风险	土壤营 养物质 风险	地质 风险	水土流 失风险	地震风 险	土壤盐碱化 风险
权重	0.009	0.011	0.018	0.070	0.056	0.009	0.022	0.096	0.022	0.017
风险 关联 因素	土壤沼 泽化风 险	滑坡 风险	泥石流 风险	底质 风险	陆生 植物 风险	陆生动 物风险	水生 植物 风险	鱼类 风险	浮游植 物风险	浮游动 物风险
权重	0.004	0.123	0.026	0.013	0.133	0.121	0.019	0.004	0.004	0.005
风险 关联 因素	微生 物风 险	库区移 民安置 风险	库区移 民健康 风险	地区 农业 风险	地区 工业 风险	库区社 会稳定 风险	地区 经济 风险	库区景 观风险	施工风 险	交通建 设风险
权重	0.015	0.004	0.027	0.048	0.024	0.016	0.018	0.011	0.042	0.016

6 结论

大型水电工程由于其本身的特殊性和复杂性,对生态环境的影响及其风险评价也具有广泛性和复杂性,本文结合重庆酉酬水电站建设案例及国内外相关文献构建了大型水电工程复杂生态环境风险关联因素及其量化维度结构,构造了生态环境风险关联因素关联度模型和权重模型,在此基础上应用聚类方法对风险关联因素进行聚类和结构分析,进一步得出生态环境风险关联因素的综合权重值,为水电工程建设生态环境保护和维护提供参考,通过采取有效措施以避免或减少生态环境风险损失,建立利国利民的环境友好型和资源节约型水电工程.同时本文也提供了一种水电工程复杂生态环境风险评价方法.

参考文献

- [1] 于艳新, 陈家军, 王红旗. 大庆地区油田开发排水工程环境风险评价初探 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 283-286.
Yu Y X, Chen J J, Wang H Q. Preliminary approach to environmental risk assessment of drainage projects during oilfield exploitation in Daqing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(2): 283-286.
- [2] 廖和平, 洪惠坤, 陈智. 三峡移民安置区土地生态安全风险评价及其生态利用模式 —— 以重庆市巫山县为例 [J]. 地理科学进展, 2007, 26(4): 33-43.
Liao H P, Hong H K, Chen Z. Risk evaluation of land ecological security issues and the pattern of eco-friendly utilization in three gorges resettlement area — Taking Wushan County as an example[J]. Progress in Geography, 2007, 26(4): 33-43.
- [3] 李松真. 公路施工期滑坡、土壤环境风险评价及评价系统研究 —— 以常吉高速公路为实例 [D]. 中南大学, 2008.
Li S Z. Research on landslide, soil environment risk assessment and its system during highway construction — A case study of Chang-Ji expressway[D]. Central South University, 2008.
- [4] 王华东, 王飞. 南水北调中线水源工程环境风险评价 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 1995, 31(3): 410-414.
Wang H D, Wang F. The environment risk assessment of the middle route of South-to-North water transferring source protect in China [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 1995, 31(3): 410-414.
- [5] 翟国静. 灰色关联度分析在水资源工程环境影响评价中的应用 [J]. 水利学报, 1997(1): 68-77.
Zhai G J. The application of grey relational grade analysis to comprehensive appraise of environmental impact in water resource project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(1): 68-77.
- [6] 徐平. 公路交通事故河流环境风险评价方法研究 [D]. 西南交通大学, 2008.
Xu P. Method of water environmental risk assessment highway construction project[D]. Southwest Jiaotong University, 2008.
- [7] 刘玉洁. 重庆巫山千丈岩梯级水电站的生态评价 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(15): 6578-6580.
Liu Y J. Evaluation on the ecology of Qianzhangyan cascade hydropower station in Wu mountain, Chongqing[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(15): 6578-6580.
- [8] Refsgaard J C, Sørensen H R, Mucha I, et al. An integrated model for the Danubian Lowland — Methodology and application[J]. Water Resources Management, 1998, 12(6): 433-465.
- [9] ElSherbiny A, Adly T. A model for environmental risk assessment for the construction of oil/gas processing facilities in coastal areas[C]// Society of Petroleum Engineers — 9th International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production 2008— In Search of Sustainable Excellence, 2008, 2: 720-725.

- [10] Scott M J, Brandt C A, et al. Modeling long-term risk to environmental and human systems at the Hanford nuclear reservation: Scope and findings from the initial model[J]. *Environmental Management*, 2005, 35(1): 84-98.
- [11] Manful D Y, Kaule G, van de Giesen N. Application of a fuzzy logic approach for linking hydro-ecological simulation output to decision support[J]. *IAHS-AISH Publication*, 2007, 3(17): 54-59.
- [12] 李桂中, 李建宗. 电力建设与环境保护 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000: 481-655.
- [13] 曹志平. 生态环境可持续管理 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 143-156.
- [14] 孔繁德. 生态保护概论 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 200-254.
- [15] 方朝阳. 水利工程施工监理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 130-134.
- [16] 程胜高. 环境影响评价与环境规划 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 103-190.
- [17] 常本春, 耿雷华, 刘翠善, 等. 水利水电工程的生态效应评价指标体系 [J]. *水利水电科技进展*, 2006, 26(6): 10-15.
Chang B C, Geng L H, Liu C S, et al. Index system for ecological effect evaluation of hydropower projects[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(6): 10-15.
- [18] 苏成权. 论水利水电工程的环境影响和对策措施 [J]. *沿海企业与科技*, 2007(12): 147-149.
Su C Q. Environmental impact and measures of hydropower project[J]. *Coastal Enterprises and Science & Technology*, 2007(12): 147-149.
- [19] 姚云鹏. 水电工程对河流生态系统的胁迫及对策研究 [J]. *黑龙江水专学报*, 2006, 33(3): 19-22.
Yao Y P. Research on the stress and countermeasures of hydropower projects to river ecosystem[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2006, 33(3): 19-22.
- [20] 张伟, 龚爱民. 浅谈水利工程对环境的影响 [J]. *河北水利*, 2005(9): 1.
Zhang W, Gong A M. The impact on environment of hydropower project[J]. *Hebei water Resources*, 2005(9): 1.
- [21] 王勇, 李均平. 论水电工程与生态环境可持续发展的关系 [J]. *水科学与工程学报*, 2008(2): 53-55.
Wang Y, Li J P. Relation of hydroelectric projects and sustainable development of ecological environment[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2008(2): 53-55.
- [22] Lovett J C, Hatton J, Mwasumbi L B, et al. Assessment of the impact of the Lower Kihansi Hydropower Project on the forests of Kihansi Gorge, Tanzania[J]. *Biodiversity and Conservation*, 1997, 6(7): 915-934.
- [23] Scudder T. The Future of Large Dams: Dealing with Social, Environmental, Institutional and Political Costs[M]. Earthscan Publications, March, 2005.
- [24] Rosenberg D M, Bodaly R A, Usher P J. Environmental and social impacts of large scale hydroelectric development: Who is listening?[J]. *Global Environmental Change*, 1995, 5(2): 127-148.
- [25] Alam M K, Mirza M R, Maughan O E. Constraints and opportunities in planning for the wise use of natural resources in developing countries: Example of a hydropower project[J]. *Environmental Conservation*, 1995, 22(4): 352-358.
- [26] Barrow C. The impact of hydroelectric development on the Amazonian environment: With particular reference to the Tucurui project[J]. *Journal of Biogeography*, 1988, 15(1): 67-78.
- [27] 李际平, 陈端吕. 森林景观类型环境耦合度模型的构建与应用 [J]. *中南林业科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 28(4): 67-71.
Li J P, Chen D L. Construction and application of environment-based coupling degree model for forest landscape types[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2008, 28(4): 67-71.
- [28] 徐选华, 陈晓红. 基于向量空间的群体聚类方法研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(6): 1034-1037.
Xu X H, Chen X H. Research on the group clustering method based on vector space[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(6): 1034-1037.
- [29] 徐选华, 陈晓红. 基于 P3&EXP&VS 平台的重庆酉酬水电站枢纽工程总承包管理信息系统 [J]. *项目管理技术*, 2009, 7(8): 72-76.
Xu X H, Chen X H. On the general contract project management information system for the pivotal project of Chongqing Youchou hydropower station based on the P3&EXP&VS platform[J]. *Project Management Technology*, 2009, 7(8): 72-76.