

# 基于耦合协调度模型的南京市用水效率与经济发展关系

耿芳,董增川,管西柯

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

**摘要:**基于 2007—2014 年南京市用水效率与经济发展的时间序列数据,构建南京市用水效率系统与经济发展系统间的耦合协调度模型,探讨南京市在 2007—2014 年期间用水效率与经济发展之间的动态均衡关系。首先对用水效率系统和经济发展系统的综合状况进行评价,然后对两系统的耦合协调度进行定量分析。结果表明:2007—2014 年南京市用水效率和经济发展水平都有大幅度增长;两者的耦合协调关系在波动中逐渐优化,2007 年处于低度协调耦合阶段,2008 年处于中度协调耦合阶段,2009—2014 年处于高度耦合协调阶段;只有提高用水效率与经济发展并举,才能保持耦合协调度的增长趋势。最后针对用水效率系统和经济发展系统存在的不足,提出在用水效率方面优化用水结构、加强水质污染治理,经济发展方面则调整经济结构、增强经济活力等建议。

**关键词:**用水效率;经济发展;耦合协调度;南京市

**中图分类号:**TV213.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1003-9511(2017)01-0021-05

城市化进程的加速、人口的持续增长、经济的快速发展等因素均导致了用水量大幅度增加。一味追求经济发展、过度开发水资源、忽略用水效率的提高以及对污水的处理,会造成用水效率与经济发展的不协调,使得城市水资源供需矛盾更为突出。《中国可持续发展水资源战略研究报告》认为,解决我国水的问题,核心是提高用水效率,建设节水型社会。所以有必要对城市用水效率和经济发展的协调度进行分析,认清城市目前的问题,制定与用水效率相协调的经济发展战略,这对实现城市社会经济的可持续发展具有重要的意义。

目前,国外对于用水效率与经济发展之间关系的研究不多。Howec<sup>[1]</sup>定性分析了水资源利用对经济增长的促进作用以及两者间的静态关系;Meinzen-Dick 等<sup>[2]</sup>研究了水资源对城市经济发展的约束与限制作用;Thawale 等<sup>[3]</sup>通过修正的 Penman 公式估算了水资源的利用情况与农业经济发展的关系。国内学者近年来在水资源与经济发展关系的研究方面也取得了一些成果。孙爱军等<sup>[4]</sup>借鉴物理学中的耦合度函数,测算了不同城市经济与用水技术效率

之间的耦合协调程度;盖美等<sup>[5]</sup>建立了水资源与经济可持续发展评价指标体系,运用可变模糊识别模型分别对大连市和辽宁沿海经济带水资源与社会经济发展之间的协调关系进行评价;李婷婷<sup>[6]</sup>构建了江苏省水资源利用与经济增长间的 VAR 模型,探讨了江苏省在 1995—2013 年间水资源利用与经济增长之间的相互动态影响;周校培等<sup>[7]</sup>采用全排列综合图示法测算了 2007—2014 年南京市水资源系统和社会经济系统的综合发展评价指数,并利用耦合协调度模型测算了两系统间的耦合协调度。

目前在对用水效率系统与经济发展系统的耦合关系进行研究时,两系统所选取的指标比较单一,且整体评价不够全面合理。据此,笔者拟以南京市为研究区域,从综合、社会、经济、生态 4 个角度出发构建用水效率系统,从经济发展规模、经济结构和经济发展活力 3 个角度出发构建经济发展系统,在确定两系统各指标权重的过程中结合熵权法,综合考虑主观和客观因素,使得评价结果更切合实际。同时在对两系统的耦合协调度进行定量分析时,还针对性地揭示了影响水资源与经济协调发展的因素,为正确

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(41471014);江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划(KYZZ15\_0136);江苏省水利科技重点项目(2016003)

**作者简介:**耿芳(1992—),女,硕士研究生,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:15295502252@163.com

**通信作者:**董增川(1963—),男,教授,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:zcdong@hhu.edu.cn

处理经济与用水效率之间的矛盾,最终为实现经济与用水效率的协调发展提供理论依据和实践指导。

## 1 研究方法

### 1.1 综合评价方法

将熵权法<sup>[8]</sup>与综合评价法有机结合,分别对用水效率与经济发展水平进行综合评价。

a. 构造判断矩阵。设有  $m$  个评价指标,  $n$  个评价对象,则判断矩阵为

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

为消除量纲的影响,增强指标的可比性,需对原始数据进行标准化处理,得到标准化矩阵:

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} \quad (2)$$

b. 利用熵权法确定指标的权重  $w_i$ 。

c. 将各个评价因子标准化的指标值与相应的权重值相乘,即得到系统的综合评价价值:

$$R = \sum_{i=1}^m z_{ij} w_i \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

### 1.2 耦合协调度模型

耦合是指系统间相互依赖、相互作用、相互协同的动态关系。通过测算用水效率与经济发展间的耦合度,可以度量两系统间协同作用的强弱程度。借鉴物理学中的容量耦合概念及其容量耦合系数模型,两个系统之间的耦合度模型<sup>[5]</sup>为

$$C = [R_1 R_2 / (R_1 + R_2)^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中: $C$  为耦合度; $R_1$ 、 $R_2$  分别为用水效率、经济发展的综合评价价值。

由于  $R_1$ 、 $R_2 \in [0, 1]$ , 因此  $C \in [0, 1]$ 。当  $C=0$  时,用水效率与经济发展无关;当  $C \in (0, 0.3]$  时,用水效率与经济发展处于低水平耦合阶段;当  $C \in (0.3, 0.5]$  时,用水效率与经济发展处于拮抗阶段;当  $C \in (0.5, 0.8]$  时,用水效率与经济发展处于磨合阶段;当  $C \in (0.8, 1]$  时,用水效率与经济发展处于高水平耦合阶段。

协调是指系统发展过程中,相互协调一致的属性。通过协调度模型<sup>[5]</sup>可以更好地判断用水效率系统与经济发展系统之间的耦合协调发展程度,公式为

$$T = (\alpha R_1 + \beta R_2)^{1/2} \quad (5)$$

$$D = (CT)^{1/2} \quad (6)$$

式中: $D$  为耦合协调度; $T$  为经济发展系统与用水效率系统的综合协调指数; $\alpha$ 、 $\beta$  为经济发展系统与用水效率系统重要程度的权系数,考虑到经济发展与用水效率的提高同等重要,取  $\alpha = \beta = 0.5$ 。

由于  $R_1$ 、 $R_2 \in [0, 1]$ , 因此  $T \in [0, 1]$ ,  $D \in [0, 1]$ 。当  $D \in [0, 0.4]$  为低度协调耦合; $D \in (0.4,$

$0.5]$  为中度协调耦合; $D \in (0.5, 0.8]$  为高度协调耦合; $D \in (0.8, 1]$  为极度协调耦合。

## 2 实例分析

### 2.1 评价指标体系的构建及权重计算

将南京市用水效率与经济耦合协调发展系统分为用水效率子系统与经济发展子系统。

在构建水资源利用效率评价指标体系时,应考虑施加在水资源系统上促使水资源利用效率发生变化的驱动力:经济(包括工业、农业)、社会、生态环境等。因此将南京市用水效率系统分解成综合用水效率、生活用水效率、生产用水效率、生态用水效率4个子集,分别从综合、社会、经济、生态4个角度评价用水效率。结合用水效率的内涵,评价主要包括经济社会发展、用水结构、单位产品水资源消耗量、水资源生态环境可持续发展等内容<sup>[9]</sup>,由此选取11个评价指标。

经济发展子系统的评价指标体系主要从经济发展规模、经济结构和经济活力3个方面构建<sup>[10]</sup>,选取包括人均GDP、城镇人均可支配收入、全社会固定资产投资额等8个评价指标。南京市用水效率与经济耦合协调发展系统综合评价指标体系见表1。

### 2.2 数据来源

主要采用2007—2014年数据对南京市用水效率与经济发展的耦合协调关系进行分析。数据来源于《南京市水资源公报》《南京市国民经济与社会发展统计公报》《南京市统计年鉴》《南京市财政决算报告》及南京市相关的统计数据 and 规划报告。

### 2.3 结果分析

#### 2.3.1 用水效率与经济发展综合评价

运用本文构建的南京市用水效率系统与经济发展系统的耦合协调度模型计算用水效率和经济发展水平的综合评价值,结果见表2。根据表2绘制出南京市用水效率和经济发展水平综合评价值的时序变化图(见图1)。由图1可以看出,南京市用水效率和经济发展状况总体上均呈上升状态,经济发展保持不断增长的趋势,用水效率则有较大幅度的波动。结合表2、图1,分析两系统的发展趋势。

a. 用水效率系统。用水效率在2007—2010年高速增长,2011年由于综合用水效率、生活用水效率、生产用水效率、生态用水效率下降的综合作用导致用水效率出现急剧下降的局面,综合评价值由2010年的0.472降至2011年的0.201。究其原因:①南京市2011年降水量大幅减少导致农业用水比例加大,而农业用水效率与工业用水、生态用水相比

表 1 南京市用水效率与经济耦合协调发展系统综合评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标	三级指标	选择依据
用水效率与经济耦合协调发展系统	综合用水效率	万元 GDP 用水量 $X_1$		从社会全行业的角度衡量社会经济发展过程中整体用水效率
		农业用水量比例 $X_2$		从用水结构的角度反映农业整体用水效率
	生活用水效率	城镇人均生活用水量 $X_3$		反映一个地区的城镇居民日常生活用水效率
		人均综合用水量 $X_4$		从人均的角度反映整体用水效率
	生产用水效率	工业 GDP 变化用水系数 $X_5$ (工业 GDP 变化量/工业用水量)		反映工业用水量产生的经济效益变化
		万元工业增加值用水量 $X_6$		反映工业的用水水平
		万元农业增加值用水量 $X_7$		反映农业的用水水平
		农业 GDP 变化用水系数 $X_8$ (农业 GDP 变化量/农业用水量)		反映农业用水量产生的经济效益变化
	生态用水效率	单位面积灌溉用水量 $X_9$		反映灌溉用水效率
		亿元 GDP 废水排放量 $X_{10}$		反映经济发展对水生态环境造成的污染压力
经济发展系统	经济发展规模	城市污水集中处理率 $X_{11}$ (集中处理的污水量/污水排放总量)		反映提高水资源利用效率、降低生态环境污染的能力
		人均 GDP $Y_1$		从人均 GDP 的角度反应经济规模
		城镇人均可支配收入 $Y_2$		从可支配收入的角度反映经济规模
	经济结构	全社会固定资产投资额 $Y_3$		从投资的角度反映经济规模
		农村恩格尔系数 $Y_4$ (食品支出总额/个人消费支出总额)		从消费支出的角度反映经济结构
		第三产业增加值占 GDP 的比例 $Y_5$		从第三产业比例的角度反映经济结构
		非农产值占 GDP 比例 $Y_6$		从非农产值比例的角度反映经济结构
	经济发展活力	财政支出占 GDP 比例 $Y_7$		从财政总支出的角度反映经济结构
	GDP 增长率 $Y_8$		反映南京市的经济活力	

表 2 南京市用水效率系统和经济发展系统综合评价结果

年份	综合评价值								
	综合用水效率	生活用水效率	生产用水效率	生态用水效率	用水效率	经济发展规模	经济结构	经济发展活力	经济发展
2007	0.007	0.002	0.050	0.067	0.126	0.003	0.005	0.050	0.058
2008	0.033	0.011	0.077	0.133	0.254	0.071	0.065	0.022	0.108
2009	0.095	0.052	0.127	0.169	0.443	0.083	0.071	0.027	0.180
2010	0.107	0.063	0.131	0.172	0.472	0.093	0.076	0.033	0.203
2011	0.041	0.030	0.070	0.060	0.201	0.130	0.102	0.110	0.342
2012	0.096	0.063	0.120	0.080	0.360	0.241	0.120	0.144	0.504
2013	0.157	0.110	0.230	0.110	0.607	0.368	0.161	0.221	0.749
2014	0.239	0.149	0.280	0.125	0.794	0.455	0.205	0.257	0.917

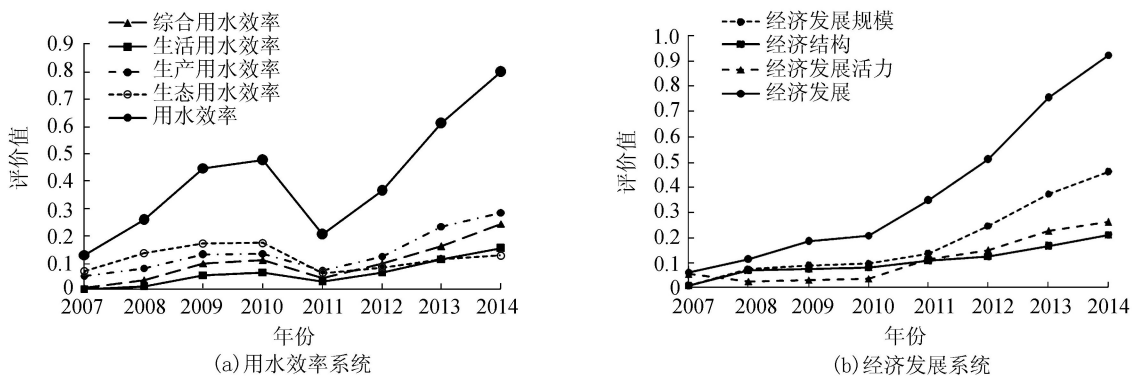


图 1 南京市用水效率系统与经济发展系统综合评价值时序变化

较低,主要表现在单位面积灌溉用水量较多,万元农业 GDP 用水量也较多等方面。②虽然降水量减少,居民生活用水量却没有相应减少,且人口自然增长率远高于 2010 年,人均日生活用水量在所研究年份中也是最大的。③南京市 2011 年水资源管理系统

还不完善,缺少严格的政策法规,对于水质污染、河道管理等问题监管不到位,导致水质不达标问题突出<sup>[7]</sup>。2012 年用水效率又恢复高速增长,这主要是因为 2012 年南京市按照《省政府关于实行最严格水资源管理制度的实施意见》的指导思想<sup>[11]</sup>,实行最

严格的水资源管理制度, 主要以实现水资源可持续利用为目标, 以水资源节约保护和优化配置为重点, 促进用水方式转变和产业结构调整, 严格取水项目审批制度和用水效率考核管理, 全面实施建设项目节水设施“三同时”(即节水设施与主体工程同时设计、同时施工、同时投入使用)管理制度, 鼓励循环用水和节水减排改造, 建立重点用水单位监管制度, 引导水资源利用向高效率、高效益和低排放、低污染方向发展。经过不懈努力, 2012—2014 年用水效率有了较大幅度的增长。

**b. 经济发展系统。** 经济发展一直保持不断增长趋势, 综合评价由 2007 年的 0.058 增长至 2014 年的 0.917。2007—2010 年间经济保持缓慢增长, 这一阶段主要受全球金融危机和需求不足的影响, 加上经济结构存在重工业突出的固有矛盾, 经济活力指标出现明显下降趋势, 使经济总体处于低谷期。2011 年开始经济发展水平总体呈现高速、稳定上升态势, 综合评价由 2011 年的 0.342 增长到 2014 年的 0.917, 经济实力明显提升。这主要是因为 2011 年南京由“十一五”规划向“十二五”规划过渡。“十二五”时期(2011—2015 年)是南京加快转变经济发展方式、创新驱动产业升级的重要时期<sup>[7]</sup>。这一阶段, 南京市摒弃以往粗放的经济展方式, 逐渐向低能耗高效率的经济发展方式过渡, 在发展经济的同时更加注重节能减排、改善生态环境, 同时调整产业结构, 加快发展科学研究、水利环境等服务业, 不断引进创新型产业等, 使得经济发展规模、经济发展活力、经济结构 3 类指标都有不同程度的巩固和提高, 其中经济发展规模增长最明显, 由 2010 年的 0.130 增长至 2014 年的 0.455, 带动了经济的快速发展。

### 2.3.2 用水效率与经济发展差距

由表 2 可以看出, 南京市用水效率与经济展的差距呈波动缩小后基本稳定不变的趋势。2007—2011 年处于不稳定的波动阶段, 经济发展水平落后于用水效率, 用水效率与经济发展之间的差距越来越大, 表现为经济发展胁迫用水效率的提高。2011—2014 年较为平稳。2011 年经济开始快速发展, 同时用水效率急剧下降, 2012 年用水效率恢复增长。这期间经济发展水平高于用水效率, 主要是因为 2011 年经济基数大于用水效率, 且受到外界条件如用水效率、生态环境的良好影响和促进, 发展迅速。这一阶段两者增速相当, 呈稳步均衡发展状态, 表现为两者相互影响, 用水效率的提高促进经济的发展, 同时又好又快的经济发展也为合理配置、高效利用水资源提供保障。

### 2.3.3 用水效率系统与经济发展系统耦合协调度

用水效率系统与经济发展系统的耦合度、耦合协调度计算结果见表 3。根据表 3 绘制南京市用水效率系统与经济发展系统的耦合度与耦合协调度时序变化图, 见图 2。

表 3 南京市用水效率系统与经济发展系统耦合协调发展评价结果

年份	耦合度	协调度	耦合协调度	耦合阶段	耦合与协调强度
2007	0.464	0.303	0.375	拮抗阶段	低度协调耦合
2008	0.458	0.425	0.441	拮抗阶段	中度协调耦合
2009	0.453	0.558	0.503	拮抗阶段	高度协调耦合
2010	0.459	0.581	0.516	拮抗阶段	高度协调耦合
2011	0.483	0.521	0.501	拮抗阶段	高度协调耦合
2012	0.493	0.657	0.569	拮抗阶段	高度协调耦合
2013	0.497	0.823	0.640	拮抗阶段	高度协调耦合
2014	0.499	0.925	0.679	拮抗阶段	高度协调耦合

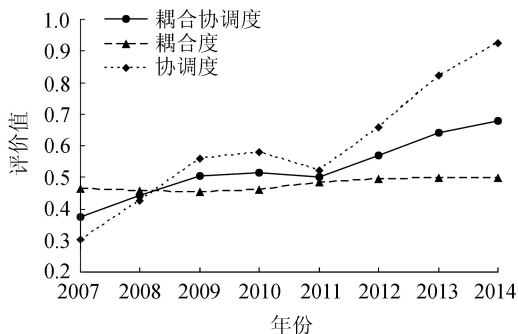


图 2 南京市用水效率系统和经济发展系统耦合协调度时序变化

**a. 从耦合度时序变化来看,** 整体上耦合度在波动中稍有提升, 2007—2014 年用水效率系统与经济发展系统的耦合度均在 0.3~0.5 之间, 表明两者处于拮抗阶段, 即用水效率与经济发展处于共同发展状态。由于耦合度逐渐趋近于 0.5, 说明二者关系在逐步走向协调, 进入磨合阶段。2007—2010 年间水资源系统是经济发展的强有力支撑; 2011—2014 年间当经济的发展逐步回归正常之后, 经济发展系统的健康发展又推动了用水效率的提高。

**b. 从耦合协调度时序变化来看,** 2007—2014 年用水效率系统与经济发展系统的耦合协调度数值一直不断增大, 表明南京市用水效率与经济发展之间关系不断改善, 逐渐趋于协调。2007—2010 年间由于用水效率与经济展的曲线轨迹不一致, 造成两者协调度较低或耦合度下降, 耦合协调度数值波动较大。2012—2014 年用水效率与经济展的曲线轨迹逐渐趋同, 耦合度与协调度都呈稳定的上升趋势, 从而促进了耦合协调度的增大, 表明用水效率与经济发展进入高度协调耦合阶段。

**c. 从整体来看,** 南京市社会经济系统与水资源

系统的耦合协调水平仍然较低,但是近 10 年的发展过程中,两系统通过内部指标间一系列内在的、相互依存和相互制约的关系互相影响,不断磨合,共同发展。用水结构的优化产生更大的经济效益;经济结构的变化影响不同部门的用水比例;经济发展过程中所排放的各类污染物,有可能污染水体造成可利用水资源量的减少,从而降低水资源利用效率<sup>[9]</sup>。未来若能保证提高用水效率与经济发展并举,则有望使两系统的发展进入极度协调耦合阶段。

### 3 结论与建议

a. 南京市用水效率与经济发展水平在研究期均有大幅度增长,2011 年以前用水效率水平高于经济发展水平,对经济发展有良好的促进作用。2011 年以后,经济高速发展,并超过用水效率水平,经济发展推动水资源的高效利用。

b. 用水效率系统与经济发展系统的耦合度在 0.3~0.5 之间,处于拮抗阶段,并逐步接近磨合阶段,表明用水效率与经济发展处于共同发展状态。用水效率系统与经济发展系统的耦合协调度在波动中逐步增大,由低度协调耦合逐步过渡到高度协调耦合阶段,未来有望进入极度协调耦合阶段。

c. 只有保持用水效率与经济的协调发展才能最终实现社会经济的可持续发展。南京市未来发展应继续重视在经济发展的同时提高用水效率。经济方面,主要通过加大科技创新投入,积极进行创新平台建设,提高企业自主创新能力等增强经济活力,并积极更新产业结构,加快经济转型。用水效率方面,用水结构必须得到实时优化,加速低耗水产业发展,限制高耗水工业项目建设和高耗水服务业发展;针对农业用水效率低下,生活、生态用水效率堪忧问题,应当继续关注农业用水效率的提高问题,遏制农业粗放用水,高度重视生活、生态用水管理工作,加强节水设施基础建设;同时应该注意维护水资源环境,防治工业污染,保障水资源良性循环,提高水资源可持续利用性。

### 参考文献:

[ 1 ] HOWEC W. Water resources and regional economic growth in the United States (1950—1960) [ J ]. Southern Economic Journal, 1968, 34 ( 4 ): 477-489.

[ 2 ] MEINZEN-DICK R, PAUL P, APPASAMY P. Urbanization and inter-sectoral competition for water [ M ] // Woodrow Wilson International Center for Scholars Environmental Change and Security Project. Finding the Source: The

Linkages Between Population and Water. Washington DC: The Woodrow Wilson Institute, 2002: 27-51.

[ 3 ] THAWALE P, GHOSH T, SINGH S, et al. Agro-economic evaluation of water resource project—a modeling approach [ J ]. Environmonit Assess, 2012, 184: 2575-2591.

[ 4 ] 孙爱军,董增川,张小艳. 中国城市经济与用水技术效率耦合协调度研究 [ J ]. 资源科学, 2008 ( 3 ): 446-453.

[ 5 ] 盖美,王宇飞,马国栋,等. 辽宁沿海地区用水效率与经济的耦合协调发展评价 [ J ]. 自然资源学报, 2013 ( 12 ): 2081-2094.

[ 6 ] 李婷,岳金桂. 基于向量自回归模型的江苏省水资源利用与经济增长关系 [ J ]. 水利经济, 2015, 33 ( 4 ): 29-34.

[ 7 ] 周校培,陈建明. 南京市水资源与社会经济耦合协调发展研究 [ J ]. 水利经济, 2016, 34 ( 4 ): 26-30.

[ 8 ] 汤溟,王腊春. 基于熵权法的南京市水资源可持续利用评价 [ J ]. 四川环境, 2010 ( 1 ): 75-79.

[ 9 ] 杨丽英,许新宜,贾香香. 水资源效率评价指标体系探讨 [ J ]. 北京师范大学学报 ( 自然科学版 ), 2009 ( Z1 ): 642-646.

[ 10 ] 韩瑞玲,佟连军,佟伟铭,等. 沈阳经济区经济与环境系统动态耦合协调演化 [ J ]. 应用生态学报, 2011 ( 10 ): 2673-2680.

[ 11 ] 沈乐,龚来存. 南京市溧水区用水效率控制方案研究 [ J ]. 人民长江, 2016 ( 1 ): 31-35.

(收稿日期:2016-06-15 编辑:胡新宇)

(上接第 21 页)

[ 12 ] 马丽. 牟汶河莱芜城区段综合治理工程影响后评价研究 [ D ]. 泰安:山东农业大学, 2011.

[ 13 ] 翁月娇,唐德善,王银银. 基于 F-AHP 法的水利加固改造工程效果后评价 [ J ]. 水电能源科学, 2009 ( 5 ): 145-148.

[ 14 ] 阳大兵. 水利工程对生态环境影响后评价研究 [ D ]. 咸阳:西北农林科技大学, 2012.

[ 15 ] 李鑫. 水利工程环境影响后评价方法及应用研究 [ D ]. 长春:中国科学院研究生院 ( 东北地理与农业生态研究所 ), 2013.

(收稿日期:2016-07-29 编辑:方宇彤)

