

新疆城镇化与生态环境耦合协调发展 时空区域差异评价研究*

帕孜丽娅木·木力提江^{1,2} 孜比布拉·司马义^{1,2,3#} 颌渊^{1,2} 郑丽^{1,2}

(1.新疆大学资源与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830046;

2.新疆大学智慧城市与环境建模普通高校重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830046;

3.新疆大学绿洲生态教育部重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要 以新疆15个地、州、市为例,采用2004—2014年城镇化与生态环境统计数据,构建城镇化与生态环境评价指标体系,通过耦合协调度模型和地理信息系统来揭示城镇化和生态环境耦合协调时空演化规律。结果表明:(1)2004—2014年,新疆15个地、州、市中,除个别地区个别年份城镇化综合指数出现回落现象外,总体呈上升趋势;生态环境综合指数呈波动上升趋势。(2)在时间序列角度,协调度体现向上趋向性,没有明显的等级跳跃。(3)新疆城镇化和生态环境协调发展空间格局特点是地域差异很大、北疆水平高于南疆。

关键词 城镇化 生态环境 耦合协调 新疆

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.09.023

Study on the evaluation of regional spatio-temporal comparative analysis of coordinated development between urbanization and ecological environment in Xinjiang Paziliyamu Mulitijiang^{1,2}, Zibibula Simayi^{1,2,3}, XIE Yuan^{1,2}, ZHENG Li^{1,2}, (1.College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046; 2.Key Laboratory of Xinjiang University Intellectualizing City and Environmental Modeling, Urumqi Xinjiang 830046; 3.Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046)

Abstract: 15 regions in Xinjiang was taken as an example. The evaluation index system of urbanization and ecological environment was constructed based on the statistical data of urbanization and ecological environment from 2004 to 2014. The urbanization and ecological environment space-time evolution of coupling coordination was revealed through the coupling coordination model and geographic information system. The results showed that: (1) In 2004-2014, the comprehensive level of urbanization of the 15 areas showed the rising trend, except for the individual regions of individual years. The comprehensive index of ecological environment presented a fluctuating rising trend. (2) In terms of time series, the coordination degree showed upward tendency, and there was no sudden change in grade. (3) The spatial pattern of the coordinated development of urbanization and ecological environment of Xinjiang was characterized by great geographical variations, coordination degree of north regions was higher than that of south regions.

Keywords: urbanization; ecological environment; coupling coordination; Xinjiang

快速推进的城镇化进程对社会经济带来积极影响的同时也使区域生态环境受到了严重危害。城镇化引起的一系列生态环境问题越来越引起人们的关注和重视,深层次探讨和研究城镇化与生态环境之间的关系成为学术界重点研究课题之一^{[1][2]}。城镇化对生态环境的胁迫作用、生态环境质量对城镇化的促进或制约性,使得系统间产生一种极复杂的交互耦合关系^[3],而力求实现两个复杂系统的协调发展是人类文明进步的体现。国外学者对城镇化与生态环境关系的研究起步于1898年HOWARD提

出的理性规划并协调城镇系统与生态环境系统交互耦合关系理论^[4];此后,REGISTER的协调性倡议掀起了有关城镇化与生态环境的“生态结构革命”^[5];1995年GROSSMAN等^[6]对人口人均收入和环境质量进行统计分析发现,生态环境质量与经济发展间有倒“U”型内在规律;PEARCE等^[7]针对随着城市扩张而日益恶化的城市生态环境问题提出了一系列促进两者协调性的对策。我国正处于城镇化的快速推进阶段,有关城镇化与生态环境问题的研究也普遍得到各界学者的重视,目前研究重点主

第一作者:帕孜丽娅木·木力提江,女,1990年生,硕士研究生,研究方向为资源利用与城乡规划。*通讯作者。

*国家自然科学基金资助项目(No.40861006);新疆大学绿洲生态教育部重点实验室开放课题(No.040076)。

要集中在两个复杂系统的耦合机制以及运用协调模型来探讨城镇化与生态环境关系并对未来协调发展趋势进行预测^[8-9]。此后,研究者连续运用数理定量统计的因子分析法、多种数学及物理模型、3S 空间技术等对城镇化与生态环境间的影响机制、演变规律及模式等方面展开了多角度的分析探讨^{[11]12};严俊霞等^[10]通过建立评价指标体系、模型,在相关统计数据的基础上,对山西省城镇化与生态环境协调发展进行了实证分析;乔标等^[11]认为,两个复杂的系统在相互作用、制约过程中推动城镇化与生态环境的耦合协调发展;张新文等^[12]在 SWOT 分析基础上,提出促进两者协调发展的相应措施与建议。

有关新疆整体城镇化综合发展水平、生态环境问题以及两者耦合协调发展研究较多,但是针对不同地区的城镇化与生态环境问题的比较研究较少,对两者协调发展关系在时间和空间尺度上的分析也相对不足。因此,本研究从耦合分析角度出发,以新疆 15 个地、州、市为研究对象,建立城镇化与生态环境评价指标体系,测度了 2004—2014 年新疆 15 个地、州、市的城镇化与生态环境综合指数,并对新疆各地、州、市城镇化和生态环境耦合协调状况展开时间序列探讨。最后,利用地理信息系统(GIS)对城镇化和生态环境耦合协调空间分异格局进行分析,并划分出主要的 3 种协调度类型。

1 研究区概况、数据来源和研究方法

1.1 研究区概况

新疆位于我国西北边陲,是我国行政面积最大的省区,作为丝绸之路经济带的核心通道,拥有独特的地理位置和经济战略地位。新疆土地面积为 32 084.53 km²,到 2014 年总人口达到 2 298.477 万,城镇人口比例为 46.07%,低于同期全国平均水平(54.77%);GDP 总量达到 9 273.46 亿元,人均 GDP 约 40 648 元,低于全国平均水平(46 628.5 元)。随着新疆城镇化进程的快速推进而出现的一系列环境污染、生态破坏等问题,使该地区意识到生态环境保护和建设的重要性。为此,自治区政府编制完成《新疆生态环境功能区划》,确定了自治区生态保护红线,修订并颁布了《新疆维吾尔自治区环境保护条例》和《乌鲁木齐市大气污染防治条例》等地方性法规,为新疆生态环境的保护和建设做出政策上的限定和规范。

1.2 数据来源

数据来源于 2004—2014 年的《新疆统计年鉴》,

新疆各地区统计年鉴,新疆城市、县城建设统计年报,新疆各地区国民经济和社会发展统计公报。时间序列以 2004—2014 年为研究范围,已对相关地区的数据进行处理,并用多重插补法对个别缺失数据进行补齐,空间格局选取 2004、2014 年为时间截面。

1.3 研究方法

1.3.1 城镇化与生态环境评价指标体系的构建

城镇化与生态环境变化是紧密相连的,因此选取指标时考虑数据的科学性和可获取性的同时,力求相关城镇化与生态环境指标能涵盖社会和自然环境^[13]。本研究在借鉴前人研究的基础上,从人口、经济、空间和生活城镇化 4 个维度构建 17 个城镇化水平综合评价指标;相对于较复杂的生态环境系统,根据数据和资料、模型,从压力、状况和响应方面设置了生态环境评价指标^[14-15]。具体见表 1。

表 1 城镇化与生态环境评价指标体系
Table 1 The comprehensive evaluation index system of the coordination development between urbanization and ecological environment

系统	子系统	指标层	效应
城镇化水平	人口城镇化	城镇人口数量	正
		城镇人口比例	正
		城镇人口增长率	正
		非农业人口比例	正
	经济城镇化	人均 GDP	正
		人均工业总产值	正
		第三产业比例	正
		工业总产值占 GDP 的比例	正
	空间城镇化	人均地方财政收入	正
		人均道路面积	正
		建成区面积	正
		人口密度	正
	社会城镇化	人均社会零售消费品总额	正
		城镇居民可支配收入	正
		万人拥有医生数量	正
		燃气普及率	正
	生态环境状态	用水普及率	正
平均海拔高度		正	
人均公园绿地面积		正	
建成区绿化覆盖率		正	
生态环境水平	生态环境压力	人均生活用水量	正
		年末人均耕地拥有量	正
		工业废水排放量	逆
	生态环境响应	生活垃圾处理量	逆
		污水处理率	正
		生活垃圾无害化处理率	正
		工业废水总处理量	正
	污水处理厂总数	正	

1.3.2 数据处理

为消除各评价指标量纲差别,使各指标因素间

具有可比性,对原始正、逆向指标进行标准化转换^{[16],[17]59}。为充分利用指标数据本身所提供的信息,防止因指标量纲和数量级不同而对权重产生影响,本研究采用能反映各指标重要程度的变异系数法^{[18]74}。

1.3.3 城镇化与生态环境综合指数及耦合度

设城镇化、生态环境综合指数分别为 $U(L)$ 和 $E(L)$,则耦合度(C)见式(1)。一般, $0 \leq C \leq 1$, C 越接近1则耦合程度越强,反之则越弱;当 $C=1$ 时耦合程度达到最大,表明系统间的相关性极强;当 $C=0$ 时,耦合程度最小,表明系统间互不相关,彼此互不影响。

$$C = \left(\frac{U(L) \times E(L)}{((U(L) + E(L))/2)^2} \right)^K \quad (1)$$

式中: K 为调节系数^{[17]60,[18]74},一般 $K \geq 2$,本研究取 $K=2$ 。

1.3.4 城镇化与生态环境耦合协调度模型

尽管 C 能较好反映城镇化与生态环境的交互影响程度,但是对于 C 相同的两个区域来说,难以真实反映区域城镇化与生态环境协调发展水平。因此,需要建立耦合协调度模型来进一步探讨城镇化与生态环境间的协调性。根据式(2)计算协调度(D),并根据其值进行耦合协调度等级划分: $>0 \sim <0.2$,严重失调; $0.2 \sim <0.3$,中度失调; $0.3 \sim <0.4$,勉强协调; $0.4 \sim <0.6$,中度协调; $0.6 \sim <0.8$,良好协调; $0.8 \sim <1.0$,优质协调。

$$D = (C(\alpha U(L) + \beta E(L)))^{1/2} \quad (2)$$

式中: α 、 β 为待定权重,本研究中由于两个系统同等

重要,故令 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

2 结果分析

2.1 城镇化与生态环境综合指数分析

以2004、2008、2012、2014年为例,由表2可见,2004—2014年,新疆15个地、州、市中,除个别地区个别年份 $U(L)$ 出现回落现象外,总体呈上升趋势。本研究将新疆各地区2004—2014年的 $U(L)$ 分为3个梯度:(1)属于第1梯度($U(L)$ 平均值 ≥ 0.400)的有乌鲁木齐市和克拉玛依市,其城镇人口比例很高。石河子市城镇人口比例2004年以来也很高,但其 $U(L)$ 并非第一,说明城镇化综合指数考虑的因素并非只看非农人口数量比例。(2)位列第2梯度($0.200 \leq U(L)$ 平均值 < 0.400)的有哈密地区、昌吉回族自治州、巴音郭楞蒙古自治州和石河子市。其中,巴音郭楞蒙古自治州和石河子市排名靠前,昌吉回族自治州和哈密地区靠后。(3)位列第3梯度($U(L)$ 平均值 < 0.200)的有吐鲁番地区、伊犁哈萨克自治州、塔城地区、阿勒泰地区、博尔塔拉蒙古自治州、阿克苏地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、和田地区。新疆位列第1梯度的地区城镇化综合水平高,并且发展迅速。这对位于第3梯度的城镇化水平相对缓慢地区具有强烈的带动性作用。地域宽广、交通设施不够完善使得城镇化水平落后的地区与都市核心区的空间距离不占优势,受到都市区辐射力度较小,随着发展,各地区间的城镇化发展差异化会越来越明显。

2004—2014年,新疆各地、州、市 $E(L)$ 呈波动

表2 2004、2008、2012和2014年新疆15地、州、市城镇化与生态环境综合指数
Table 2 Xinjiang regional urbanization and ecological environment comprehensive development index in 2004, 2008, 2012 and 2012

地区	2004		2008		2012		2014		$U(L)$ 平均值	$E(L)$ 平均值
	$U(L)$	$E(L)$	$U(L)$	$E(L)$	$U(L)$	$E(L)$	$U(L)$	$E(L)$		
乌鲁木齐市	0.316	0.170	0.392	0.192	0.440	0.221	0.453	0.215	0.400	0.199
克拉玛依市	0.419	0.160	0.496	0.183	0.474	0.224	0.482	0.212	0.468	0.195
吐鲁番地区	0.163	0.091	0.143	0.081	0.184	0.123	0.185	0.095	0.169	0.097
哈密地区	0.159	0.112	0.212	0.093	0.222	0.125	0.238	0.110	0.208	0.110
昌吉回族自治州	0.177	0.081	0.203	0.099	0.232	0.140	0.248	0.158	0.215	0.120
伊犁哈萨克自治州	0.146	0.093	0.195	0.117	0.193	0.136	0.194	0.132	0.182	0.119
塔城地区	0.104	0.071	0.142	0.140	0.156	0.139	0.181	0.193	0.146	0.134
阿勒泰地区	0.101	0.113	0.131	0.110	0.134	0.099	0.126	0.127	0.123	0.112
博尔塔拉蒙古自治州	0.124	0.091	0.166	0.140	0.149	0.113	0.161	0.088	0.150	0.107
巴音郭楞蒙古自治州	0.192	0.131	0.219	0.170	0.238	0.151	0.241	0.149	0.222	0.151
阿克苏地区	0.130	0.122	0.188	0.130	0.173	0.131	0.170	0.108	0.165	0.122
克孜勒苏柯尔克孜自治州	0.076	0.061	0.121	0.080	0.148	0.073	0.148	0.088	0.124	0.076
喀什地区	0.090	0.063	0.107	0.090	0.096	0.083	0.141	0.096	0.109	0.082
和田地区	0.185	0.091	0.075	0.060	0.100	0.070	0.106	0.050	0.117	0.069
石河子市	0.184	0.122	0.218	0.130	0.278	0.109	0.273	0.094	0.238	0.113

上升趋势。对各地区 $E(L)$ 进行梯度分类:(1)乌鲁木齐市、克拉玛依市、巴音郭楞蒙古自治州位列第1梯度($E(L)$ 平均值 ≥ 0.150)。这些地区经济发展,城镇化水平也达到相对较高水平,相比于其他地区有更多的能力投入到生态环境保护和建设工作。(2)位列第2梯度($0.100 \leq E(L)$ 平均值 < 0.150)的有哈密地区、昌吉回族自治州、伊犁哈萨克自治州、塔城地区、阿勒泰地区、博尔塔拉蒙古自治州、阿克苏地区、石河子市。这些地区的城镇化水平还处于努力发展阶段,城镇化建设还在较大程度上依赖于资源环境和生态环境。(3)位列第3梯度($E(L)$ 平均值 < 0.100)的有吐鲁番地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、和田地区,这些地区位于沙漠地区,较差的自然环境和城镇化建设对生态环境的破坏,致使 $E(L)$ 处于靠后地位。

2.2 新疆城镇化与生态环境耦合协调发展时间变化分析

根据表3,对各地区的 D 进行梯度划分:(1)位列第1梯度($0.3 \leq D$ 平均值 < 0.4)的有乌鲁木齐市、克拉玛依市和巴音郭楞蒙古自治州。乌鲁木齐市和克拉玛依市基本保持勉强协调水平,巴音郭楞蒙古自治州从2004年的中度失调后也持续保持勉强协调发展水平。(2)其他12个地、州、市位列第2梯度($0.2 \leq D$ 平均值 < 0.3),总体保持中度失调。在时间序列角度, D 体现向上趋向性,没有明显的等级跳跃。由此可见,新疆各地区在城镇化发展中还很大程度上依赖于生态环境,以生态环境的牺牲为代价得到经济增长和城镇化发展。

2004年,克拉玛依市的 D 最高(0.360),处于城

镇化与生态环境的勉强协调阶段,到2014年其排名还保持位列第一,不过并未发生等级上的变动,只是协调水平略有上升。2004—2014年,城镇化与生态环境协调水平排名靠后的是克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、和田地区等。这与当地落后的经济状况、较低城镇化水平和恶劣的自然生态环境息息相关。

2.3 新疆城镇化与生态环境耦合协调发展空间格局分析

基于GIS分析,对新疆15个地、州、市2004、2014年城镇化与生态环境协调发展的空间分异演化特征进行空间对比分析研究。新疆城镇化和生态环境协调发展空间格局特点:(1)地域差异很大,新疆总体上城镇化与生态环境耦合协调发展还处于中等偏下水平。在城镇化发展和生态环境保护建设中各地区两个系统的协调发展水平出现脱节现象。(2)北疆水平高于南疆。在新疆划分标准中,克孜勒苏柯尔克孜自治州、巴音郭楞蒙古自治州、喀什地区、和田地区、阿克苏地区属于南疆地区,其余是北疆地区(为了便于对比属于东疆的吐鲁番地区和哈密地区划分为北疆地区)。

2004—2014年新疆的城镇化与生态环境空间分异演化演变特征:(1)中度失调区:2004年属于该类型的地区包括吐鲁番地区、哈密地区、昌吉回族自治州、伊犁哈萨克自治州、塔城地区、阿勒泰地区、博尔塔拉蒙古自治州、巴音郭楞蒙古自治州、阿克苏地区、石河子市;2014年属于此类型的有吐鲁番地区、哈密地区、伊犁哈萨克自治州、阿勒泰地区、博尔塔拉蒙古自治州、阿克苏地区、克孜勒苏柯尔克孜自治

表3 2004—2014年新疆15地、州、市城镇化与生态环境耦合协调发展状况

Table 3 Xinjiang regional urbanization and ecological environment coupling coordination situation from 2004 to 2014

地区	D											D 平均值
	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	
乌鲁木齐市	0.340	0.455	0.345	0.371	0.370	0.372	0.385	0.396	0.395	0.400	0.395	0.384
克拉玛依市	0.360	0.464	0.369	0.381	0.388	0.392	0.406	0.375	0.403	0.401	0.399	0.394
吐鲁番地区	0.244	0.298	0.261	0.222	0.232	0.235	0.247	0.245	0.274	0.249	0.257	0.250
哈密地区	0.259	0.312	0.264	0.271	0.265	0.269	0.288	0.288	0.289	0.293	0.284	0.280
昌吉回族自治州	0.246	0.357	0.283	0.257	0.266	0.288	0.284	0.280	0.300	0.307	0.315	0.289
伊犁哈萨克自治州	0.241	0.290	0.274	0.255	0.275	0.264	0.269	0.275	0.285	0.281	0.283	0.272
塔城地区	0.206	0.259	0.275	0.259	0.263	0.263	0.266	0.266	0.271	0.289	0.306	0.266
阿勒泰地区	0.230	0.267	0.239	0.252	0.244	0.234	0.254	0.233	0.240	0.252	0.252	0.245
博尔塔拉蒙古自治州	0.231	0.292	0.272	0.239	0.274	0.255	0.254	0.258	0.255	0.269	0.244	0.258
巴音郭楞蒙古自治州	0.281	0.314	0.301	0.311	0.312	0.322	0.321	0.311	0.308	0.308	0.308	0.309
阿克苏地区	0.250	0.295	0.268	0.270	0.279	0.283	0.272	0.275	0.274	0.264	0.260	0.272
克孜勒苏柯尔克孜自治州	0.187	0.224	0.217	0.192	0.220	0.213	0.223	0.203	0.228	0.239	0.239	0.217
喀什地区	0.191	0.275	0.252	0.201	0.221	0.218	0.213	0.216	0.212	0.221	0.242	0.224
和田地区	0.301	0.257	0.223	0.180	0.187	0.201	0.213	0.205	0.204	0.179	0.200	0.214
石河子市	0.271	0.319	0.265	0.276	0.289	0.284	0.294	0.248	0.295	0.299	0.283	0.284

州、喀什地区、和田地区、石河子市。说明在城镇化发展中,有些地区转变更高级的协调发展类型,在城镇化发展的同时也注重生态环境的保护和建设,而有些地区的协调性下降,以粗放型的城镇发展为主要模式,对区域生态环境造成较大影响。(2)勉强协调区:2004年属于该类型的地区包括乌鲁木齐市、克拉玛依市、和田地区;2014年属于此类型有乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉回族自治州、塔城地区、巴音郭楞蒙古自治州。2014年和和田地区变为中度失调类型,巴音郭楞蒙古自治州变为勉强协调类型。可见近11年的时间有些地区城镇化与生态环境协调水平未发生等级转变性的变化,有些地区努力向更加协调水平发展,而有些地区失去平衡发展,使城镇化与生态环境有失协调。(3)中度协调区:2005、2013年的乌鲁木齐市以及2005、2010、2012、2013年的克拉玛依市出现过中度协调。可见作为两个重工业基地的乌鲁木齐市和克拉玛依市,在发展过程中努力兼顾到环境保护和城镇化建设,而新疆的城镇化和生态环境建设工作有待于加强。

3 结 论

(1) 2004—2014年,新疆15个地、州、市中,除个别地区个别年份 $U(L)$ 出现回落现象外,总体呈上升趋势; $E(L)$ 呈波动上升趋势。

(2) 在时间序列角度, D 体现向上趋向性,没有明显的等级跳跃。

(3) 新疆城镇化和生态环境协调发展空间格局特点是地域差异很大、北疆水平高于南疆。

参考文献:

- [1] 张荣天,焦华富.中国省际城镇化与生态环境的耦合协调与优化探讨[J].干旱区资源与环境,2015,29(7).
- [2] 郭月婷,徐建刚.基于模糊物元的淮河流域城市化与生态环境系统的耦合协调测度[J].应用生态学报,2013,24(5):1244-1252.
- [3] 谭俊涛,张平宇,李静,等.吉林省城镇化与生态环境协调发展的时空演变特征[J].应用生态学报,2015,26(12):3827-3834.
- [4] 宋建波,武春友.城市化与生态环境协调发展评价研究——以长江三角洲城市群为例[J].中国软科学,2010(2):78-87.
- [5] 刘玉.扬州市城镇化与生态环境协调发展研究[D].武汉:华中师范大学,2012.
- [6] GROSSMAN G, KRUEGER A. Economic growth and the environment[J]. Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [7] PEARCE D W, KERRY TURNER R. Economics of natural resources and the environment [M]. New York: Harvester Wheatsheaf, 1990.
- [8] 刘耀彬,宋学峰.城市化与生态环境耦合模式及判别[J].地理科学,2005,25(4):408-414.
- [9] 刘超,林晓乐.城镇化与生态环境交互协调行为研究——以黄河三角洲为例[J].华东经济管理,2015,29(7):49-58.
- [10] 严俊霞,冯璐,薛占金,等.山西省城市化与生态环境综合水平协调度分析[J].山西大学学报(自然科学版),2013,36(2):313-318.
- [11] 乔标,方创琳.城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J].生态学报,2005,25(11):3003-3009.
- [12] 张新文,张国磊.广西城镇化与农村生态环境协同发展研究——基于SWOT分析[J].广西社会科学,2014(2):20-24.
- [13] 侯培,杨庆媛,何建,等.城镇化与生态环境发展耦合协调度评价研究——以重庆市38个区县为例[J].西南师范大学学报,2014,39(2):80-86.
- [14] 李光勤.城镇化与生态环境协调发展度研究——以浙江省58县为例[J].浙江林业科技,2013,33(3):47-51.
- [15] 巩芳,李婷.内蒙古城镇化与生态环境协调发展分析[J].资源与环境,2014,30(9):1070-1073.
- [16] 侯培,李超,杨庆媛.重庆市近12年城镇化与生态环境协调发展评析[J].水土保持研究,2015,22(5):240-244.
- [17] 武珊珊,任建兰,刘树峰.快速城市化时期山东省城镇化与生态环境协调发展时空比较研究[J].鲁东大学学报,2014,30(1).
- [18] 崔木华.中原城市群9市城镇化与生态环境耦合协调关系[J].经济地理,2015,35(7).

编辑:黄 苇 (收稿日期:2016-03-01)

(上接第1042页)

- [13] 刘浩.基于价值工程理论的体育馆天然光环境设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:18-25.
- [14] 石刚,杨玉峰,李锐,等.基于价值工程的南水北调中线北京段方案优选[J].人民黄河,2010,32(11):105-106,108.
- [15] 江磊,帅永忠.基于价值工程的中小河流可调控溢流坝的比选及应用[J].人民珠江,2014,35(5):94-97.
- [16] 黄伟烈.价值工程提升高炉设备采购的济经效益[J].化学工程与装备,2013(11):217-220.
- [17] COPPI R, DURSO P. Fuzzy K-means clustering models for triangular fuzzy time trajectories[J]. Statistical Methods and Applications, 2002, 11(1):21-40.
- [18] POP B, STANCU MINASIAN I M. A method of solving fully fuzzified linear fractional programming problems[J]. Journal of Applied Mathematics and Computing, 2008, 27(1):227-242.
- [19] CHOU C H, LIANG G S, CHANG H C. A fuzzy AHP approach based on the concept of possibility extent[J]. Quality and Quantity, 2013, 47(1):1-14.
- [20] JIN J L, WEI Y M, ZOU L L, et al. Risk evaluation of China's natural disaster systems: an approach based on triangular fuzzy numbers and stochastic simulation[J]. Natural Hazards, 2012, 62(1):129-139.
- [21] YANG X L, DING J H, HOU H. Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measures analysis[J]. Natural Hazards, 2013, 68(2):657-674.
- [22] 李飞,黄瑾辉,曾光明,等.基于三角模糊数和重金属化学形态的土壤重金属污染综合评价模型[J].环境科学学报,2012,32(2):432-439.
- [23] 邓仁健,任伯帆,周赛军,等.采用三角模糊数层次分析法选择小型污水处理工艺[J].环境工程,2010,28(1):91-93.
- [24] 杜大仲,孟宪林,马放.北方某城市河流型饮用水水源地选址方案评价研究[J].中国环境科学,2012,32(2):359-365.
- [25] 金毓奎,李坚,孙治荣,等.环境工程设计基础[M].北京:化学工业出版社,2008.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2016-05-06)