

Analysis of Interactive Coupling Mechanism between Urbanization and Water Resource Environment in the Xiangjiang River Basin

Xingle Luo, Zhimei Jiang, Chujing Zheng, Jingbao Li*

College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha Hunan
Email: 2811320530@qq.com, *lijingbao1951@126.com

Received: Nov. 25th, 2017; accepted: Dec. 5th, 2017; published: Dec. 13th, 2017

Abstract

Based on the comprehensive index system between urbanization and water resource & environment of the Xiangjiang River basin, a coupling coordination model and GRA (Grey Relational Analysis) model were established to analyze quantitatively space-time dynamics of urbanization and water resources environment by coupling coordination degree, and to reveal the interactive coupling mechanism of two systems. The results are: 1) In the last 15 years, the coupling coordination between urbanization and water resources & environment in the Xiangjiang River basin trends upward totally while the internal mechanism remains to be optimized. 2) The coordination degrees of these cities show characteristically spatial differentiation, which is related to the economic development and natural conditions. 3) The driving mechanism is extremely complicated. As a whole, the background of water resources is the main determinant of water resources and environment while the population structure is the main stressor of that. Economic urbanization is the main determinant of the urbanization level of a river basin while the water supply facilities and environmental pressure primarily constrain the process of urbanization. However, the driving mechanism of each city shows pertinent regional differences, which is closely related to the urban economic development model.

Keywords

Urbanization, Water Resource and Environment, Interactive Coupling, Sequential Variation, Xiangjiang River Basin

湘江流域城市化与水资源环境交互耦合机制研究

罗幸乐, 蒋智美, 郑楚菁, 李景保*

湖南师范大学, 资源与环境科学学院, 湖南 长沙
Email: 2811320530@qq.com, *lijingbao1951@126.com

作者简介: 罗幸乐(1995-), 男, 研究方向为水资源开发与保护。
*通讯作者。

文章引用: 罗幸乐, 蒋智美, 郑楚菁, 李景保. 湘江流域城市化与水资源环境交互耦合机制研究[J]. 水资源研究, 2018, 7(1): 84-96. DOI: 10.12677/jwrr.2018.71010

收稿日期: 2017年11月25日; 录用日期: 2017年12月5日; 发布日期: 2017年12月13日

摘要

为研究湘江流域城市化与水资源环境的耦合协调机制, 本文利用流域内8个市州2000~2014年的统计数据, 在建立城市化与水资源环境系统综合指标体系的基础上, 构造耦合协调模型、灰色关联模型, 揭示两系统的交互耦合机制, 并运用ArcGIS的Jenks分类法分析流域耦合协调度的时空演变态势。结果表明: 1) 湘江流域15年来城市化与水资源环境的协调关系总体趋向良性发展, 耦合协调度从0.65波动上升至0.92。2) 流域内各市州城市化与水资源耦合协调度表现出复杂的空间分异特征, 随着各市州经济状况、自然条件的差异而有所不同。3) 水资源本底条件是影响水资源环境的决定因素, 人口规模、结构和科技水平则是水资源环境的主要胁迫因素; 经济要素在城市化进程中起关键作用, 供水设施和环境压力为城市化水平的主要约束因素。流域内城市化与水资源系统间驱动机制错综复杂, 与各城市经济发展模式存在较大关联。

关键词

城市化, 水资源环境, 交互耦合, 时序变化, 湘江流域

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水是生命之源, 生态之基, 也是生产之要。随着我国城市化率的快速增大(从1978年的18%上升到2016年的56.1%), 水资源供需矛盾日趋凸显。城市化发展与水资源的耦合协调关系已成为推进经济社会发展和生态文明建设的关键问题。因此, 探究城市化进程与水资源环境间的耦合演变态势与内在机制具有重要的战略意义[1]。

国外学者较早研究城市发展过程中水资源变更的相关内容, 主要关注城市化过程中气候、人口等变化对水资源的影响[2] [3] [4]。近年来, 国内外学者开始关注水资源环境与城市化发展的相互关系, 从地理学、经济学、生态学、社会学等不同角度展开深入研究[5] [6] [7] [8]。城市化与水资源环境的交互关系, 主要体现在城市化进程中水资源环境的变化和水资源环境对城市发展的约束作用。城市化对水资源影响的研究主要集中在单个城市的水质、需水量与水循环等方面, 如汪慧珍等[9] [10] [11]分析了北京市雨水径流的污染源并估算其污染量。在水资源对城市化发展的影响方面, 董林等[12]研究得出, 水资源对城市可持续发展的约束主要表现为功能性约束、生态性约束、经济型约束和制度性约束几大方面。

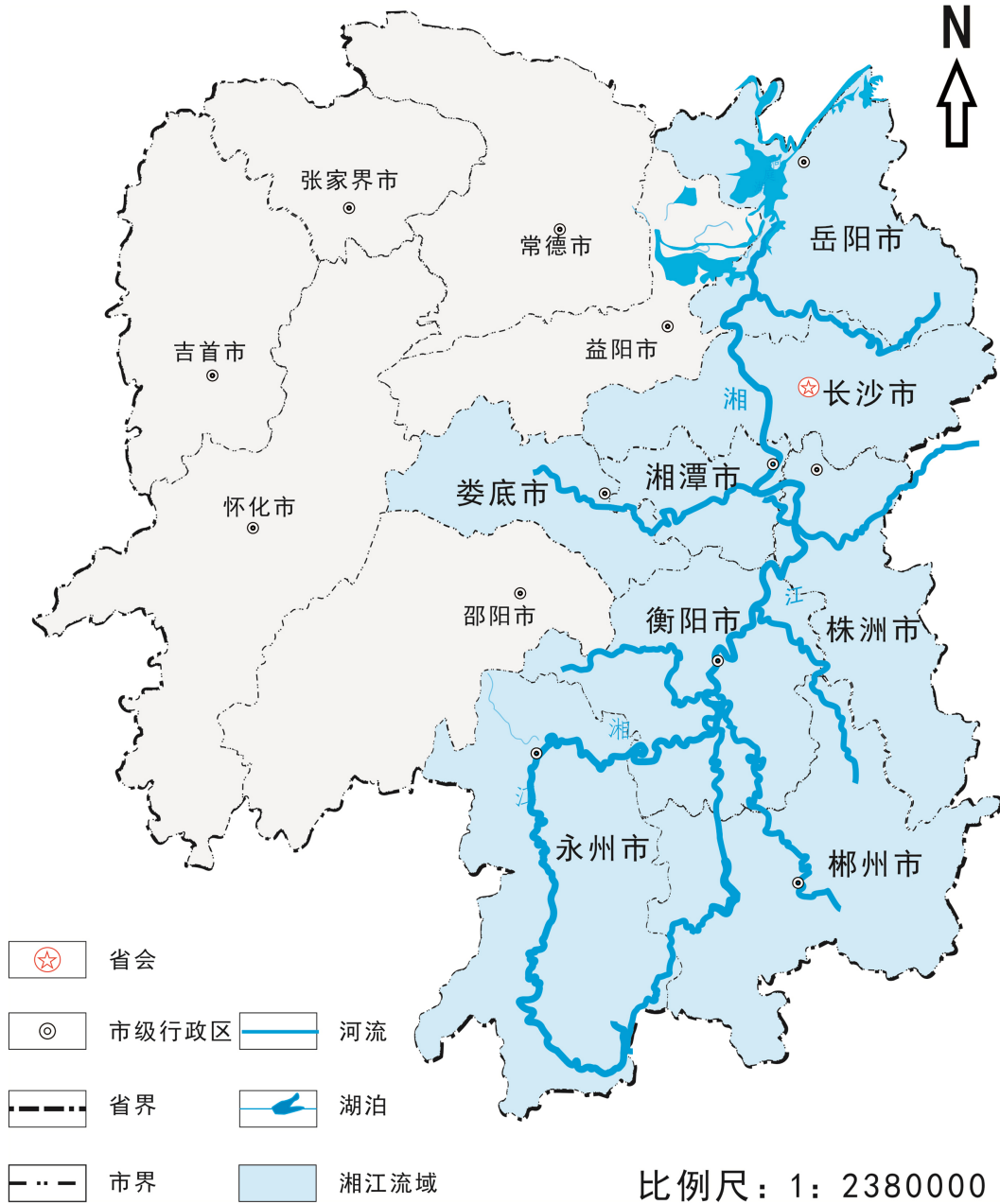
综上所述, 国内外学者对该领域的研究已取得丰硕成果, 但研究区域主要集中在资源型缺水地区, 对相对“丰水”地区研究较少。而随着中部城市群建设的推进, 诸多“丰水”地区城市化发展与水资源环境之间的耦合协调关系也日趋失调, 许多问题亟待探讨。湘江流域是湖南省经济高速发展的区域, 对湖南主动参与国家“一带一路”、长江经济带的实施具有重要意义。鉴于此, 本文以湘江流域为研究对象, 运用变差系数法和半升梯形模糊隶属度函数, 建立湘江流域的城市化与水资源环境综合指标体系; 通过构造耦合协调模型和灰色关联模型, 剖析流域内城市化与水资源环境耦合协调关系的时空演变态势及其交互耦合机制, 为湘江流域优化水资源配置、提升水资源利用率, 加快城市化建设提供理论依据。

2. 研究区域及方法

2.1. 研究区域概况

湘江流域位于 110°30'~114°01'E, 24°31'~29°01'N 之间, 地跨岳阳、长沙、湘潭、株洲、衡阳、娄底、永州、郴州 8 个地级市(图 1), 地貌以山地、丘陵为主, 属亚热带湿润季风气候。该流域降水时空分布极不均匀: 时间分布上, 降水多集中在汛期(4~6 月); 空间分布上, 上游多年平均降水量 1400~1600 mm, 中游衡邵盆地 1200~1400 mm, 下游丘岗 1200 mm, 差距较大[13]。

湘江流域是湖南省的核心经济带, 流域内城镇密集、工业集聚, 人口约占全省总人口的 60%, 工业总产值



约占全省工业总产值的 81%，全省冶金、化工、机械、纺织等行业大多集中该区，因此湘江流域也是典型的污染区。独特的气象水文条件和与沪宁杭地区相比落后的经济发展模式使属于“丰水”地区的湘江流域的城市化进程受季节性缺水与水质型缺水的双重约束。具体表现为：1) 季节性缺水。汛期(4~6 月)的降水量可占全年降水的 67.1%，秋冬季地表径流量较少。2) 水质型缺水。2011 年 3 月，湘江流域获批成为全国首例由国家主导的重金属污染治理区域。水资源年内分配不均又进一步加剧了流域的季节性污染，水资源供需矛盾激化。3) 存在水资源竞争的风险。由于水资源管理模式与经济发展不匹配，各市州可能因取水、排污产生纠纷。4) 水资源无序开发导致水生态环境恶化。干、支流过度的水电梯级开发、采砂等不合理利用改变了径流的天然属性，造成河流生态环境质量退化。

2.2. 研究方法

2.2.1. 指标体系的建立

本文基于城市化与水资源环境的内涵，运用康慕谊城市化概念模型[14]和 PSR (压力 - 状态 - 响应)概念模型[15][16]，遵循科学性、动态性、综合性、可获得性等原则，结合湘江流域实际情况，初选出评价指标体系，再运用相关系数法和主成分分析法对初选体系进行筛选，最后建立湘江流域城市化系统与水资源环境系统耦合评价指标体系(表 1)。

城市化的定义主要包括人口增长、经济发展、生活水平提高和空间扩张。因此本文从人口、经济、社会 and 空间 4 个方面出发，选取 16 项指标构建城市化系统的评价体系。

水资源环境具有量与质的双重属性。因此本文从水资源水平、水资源环境压力、水资源环境响应 3 个方面，选取 20 项指标构建水资源环境系统评价体系。

2.2.2. 数据来源与预处理

由于湘江流域无专门性统计数据，本文采用湘江流域内 8 个市州的面板数据进行分析。相关数据均引自 2000~2015 年《湖南统计年鉴》、《湖南省环境公报》、《湖南省水资源公报》、《湖南农村统计年鉴》、《统计年鉴》、《水资源公报》、《环境状况公报》，以及流域内 8 个市州的社会经济发展规划。

因原始数据量纲、量级不同，无法直接比较，为使指标之间具有可比性，本文使用 SPSS21.0 软件，采取模糊隶属度函数[17]，对 8 个市州 2000~2014 年的指标原始数据进行标准化处理。

对正程指标，采用半升梯形模糊隶属度函数：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - m_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} = \begin{cases} 1 & (x_{ij} \geq M_{ij}) \\ \frac{x_{ij} - m_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} & (m_{ij} \leq x_{ij} \leq M_{ij}) \\ 0 & (x_{ij} \leq m_{ij}) \end{cases}$$

对逆程指标，采用半降梯形模糊隶属度函数：

$$x'_{ij} = \frac{M_{ij} - x_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} = \begin{cases} 1 & (x_{ij} \leq m_{ij}) \\ \frac{M_{ij} - x_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} & (m_{ij} \leq x_{ij} \leq M_{ij}) \\ 0 & (x_{ij} \geq M_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： x_{ij} 为具体指标的属性值； i 代表年份， j 代表第 i 年的指标数； M_{ij} 、 m_{ij} 分别代表第 i 年第 j 个指标的最大值和最小值； x'_{ij} 代表第 i 年第 j 个指标的隶属度。

Table 1. Coupling evaluation indicator system between urbanization system and water resource & environment system in Xiangjiang River Basin**表 1.** 湘江流域城市化系统与水资源环境系统耦合评价指标体系

功能团	指标族	指标	指标性质
城市化系统	人口城市化	全市年末常住总人口(人)	正程指标
		农村从业人口(万人)	正程指标
	人口结构	城市化水平(%)	正程指标
		人均地区生产总值(元)	正程指标
	经济城市化	地区生产总值(亿元)	正程指标
		工业总产值(亿元)	正程指标
		第三产业生产总值(亿元)	正程指标
		第三产业第二产业的产值比	正程指标
	经济结构	第三产业在 GDP 中的比重(%)	正程指标
		拥有执业助理医师数(万人)	正程指标
		每万人拥有公共交通工具(标台)	正程指标
		人均公园绿地面积(m ²)	正程指标
	社会城市化	普通高校在校学生数(万人)	正程指标
		建成区总面积(hm ²)	正程指标
		人均拥有道路面积(m ²)	正程指标
		城市人口密度(人/km ²)	逆程指标
水资源环境系统	水资源水平	人均综合用水量(m ³ /人)	逆程指标
		人均日生活用水量(升)	正程指标
		用水普及率(%)	正程指标
		资源丰度	正程指标
	资源丰度	年降水量(亿 m ³)	正程指标
		地表水资源(亿 m ³)	正程指标
		地下水资源量(亿 m ³)	正程指标
		设施水平	正程指标
	设施水平	年末供水总量(万吨)	正程指标
		供水管道长度(km)	正程指标
		水库(座)	正程指标
	水资源环境压力	城市污水总排放量(万 m ³)	逆程指标
		万元 GDP 污水排放量(m ³ /万元)	逆程指标
		环境压力	正程指标
		生产用水(万吨)	逆程指标
	环境压力	公共服务用水(万吨)	逆程指标
		家庭用量(万吨)	逆程指标
		总用水量(亿 m ³)	逆程指标
		有效灌溉面积(千公顷)	逆程指标
	水资源环境响应	污水处理率(%)	正程指标
		污水处理厂处理能力(万 m ³ /日)	正程指标
		污水年处理量(万 m ³)	正程指标
		资源利用效益	逆程指标
	资源利用效益	万元 GDP 用水量(m ³ /万元)	逆程指标

2.2.3. 权重计算

城市化与水资源环境系统之间涉及因素众多,难以量化。变差系数法[18]是一种客观赋权方法,其原理是根据变异程度来评估指标所反映的信息量的大小。故本文运用变差系数法计算各指标所占权重,以便进行有效对比。具体步骤如下:

第一步,构造城市化与水资源评价体系指标特征值矩阵。

第二步,算出各指标的平均值 $\bar{X}_j$ 和标准差 S_j , 变异系数的计算公式为:

$$V_j = S_j / \bar{X}_j$$

其中:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}, S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \quad (j=1,2,3,\dots,20) \quad (2)$$

第三步,归一化处理,求出各指标在所属系统中所占权重:

$$\omega_j = V_j / \sum_{j=1}^{20} V_j \quad (3)$$

第四步,求得单项指标的得分:

$$S_{ij} = \omega_j \times x'_{ij} \quad (4)$$

第五步,第 i 项评价对象的综合水平得分为:

$$S_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} \quad (5)$$

式中: X_{ij} 代表第 i 个样本的第 j 项指标值, $\max X_j$, $\min X_j$ 分别代表所有样本中第 j 项指标的最大值和最小值, m 是评价样本数, n 是指标数。

2.2.4. 耦合协调度模型

由于城市化和水资源环境系统间具有交互和滞后变化的特征,当两系统综合水平得分较低但数值相近时,单独使用耦合度模型会出现耦合度虚高的伪协调评价结果。因此,在耦合度模型基础上构建耦合协调度模型[19],依此判别城市化系统与水资源环境系统间的协调发展程度。其计算公式为:

$$C_n = \left[\frac{(u_1 \times u_2 \times \dots \times u_n)}{\prod (u_i + u_j)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$T = (\alpha U_1 + \beta U_2)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: C 为耦合度, D 为协调度,其计算公式为:

$$D = (C \times T)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

由于本文只涉及城市化和水资源环境两个子系统,因此 $n=2$ 。 T 为两系统间的综合协调指数。 U_1 、 U_2 分别为城市化水平和城市水资源环境的综合评价得分, α 、 β 为待定系数。由于城市化水平和城市水资源环境同等重要,因此 α 、 β 都取 0.50。

2.2.5. 灰色关联度模型

湘江流域城市化与水资源环境系统是一个部分信息已知而内部机理未知的耦合系统,因此本文根据灰色系统理论,建立灰色关联度(GRA)模型[20],对 8 个市州城市化进程与水资源环境间的驱动因素进行量化分析。首先采用公式(1)进行无量纲化处理,再按公式(9)计算其关联系数。

$$\sum_{i=1}^n \delta_{ij}(t) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t) + k\Delta_{\max}} \quad (9)$$

式中： $\sum_{i=1}^n \delta_{ij}(t)$ 为 $Z_j^y(t)$ 对 $Z_i^x(t)$ 在 t 时的关联函数， $\Delta_{ij} = |Z_j^y(t) - Z_i^x(t)|$

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} &= \max \max |Z_i^x(t) - Z_j^y(t)| \\ \Delta_{\min} &= \min \min |Z_i^x(t) - Z_j^y(t)| \end{aligned} \quad (10)$$

$Z_i^x(t)$ 和 $Z_j^y(t)$ 分别表示长沙市 t 时刻城市化与水资源环境水平的标准化值， k 为分表系数，一般取 0.5。由于关系系数只代表各个时刻的关联程度，多且分散；为方便比较，采用求平均值的方法将各时刻关联系数集中在一个值上，其公式为：

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{ij}(t) \quad (11)$$

通过比较各关联度 γ_{ij} 值的大小，可以得出某一系统指标对另一系统影响程度的大小。若 $\gamma_{ij} = 1$ ，表明城市水资源环境系统中的某项指标与城市化水平 $Z_i^x(t)$ 之间有密切关联，且变化规律完全相同；若 $0 < \gamma_{ij} < 1$ 时， γ_{ij} 值愈大，表明关联度愈强； γ_{ij} 值愈小，则表明关联度愈弱。

3. 测度结果与分析

3.1. 湘江流域城市化与水资源环境系统耦合协调度时序演变态势

为较好揭示湘江流域城市化与水资源环境系统耦合的时序变化规律，在研究过程中选取历年湘江流域各城市样点为截面数据，利用式(8)求得该流域 2000~2014 年的城市化系统与水资源环境系统耦合协调度(图 2)。

从图 2 可知，在长时间序列上，该系统的耦合协调度总体上呈递增趋势，说明 15 年间湘江流域城市化与水资源环境的耦合协调关系正趋向良性发展。其中，城市化系统的综合得分与水资源环境系统综合得分均呈一定的上下波动，且水资源环境系统综合得分浮动较大；说明在整体优化的大背景下，两者耦合协调的内部机制有

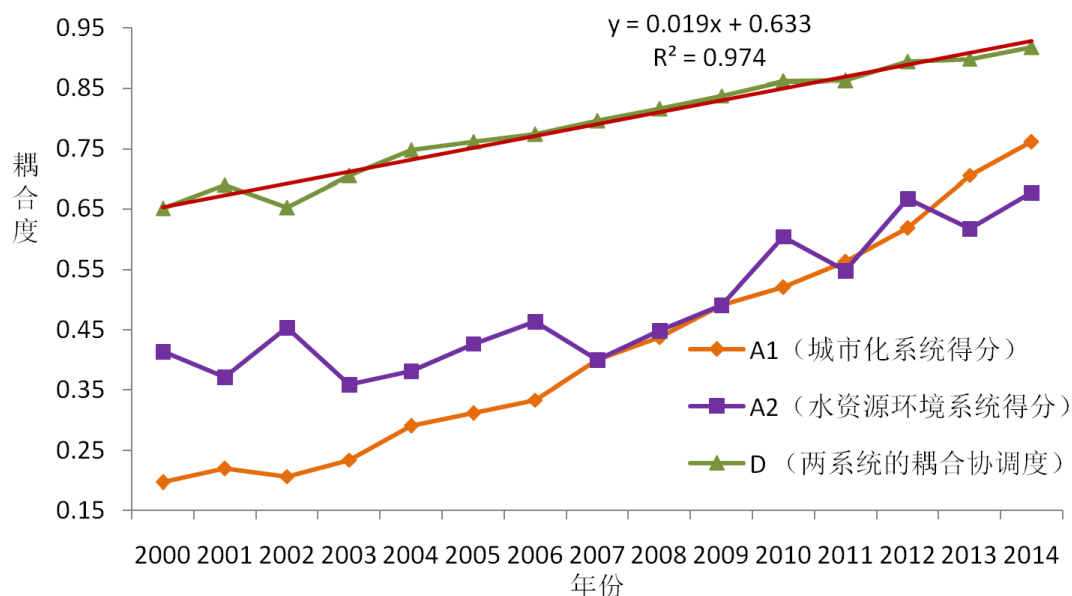


Figure 2. The temporal dynamics of urbanization system, water resource & environment system and coupling coordination degree across the study area in 2000~2014

图 2. 2000~2014 年研究区城市化系统、水资源系统得分及耦合协调度时序变化

待完善，内部驱动规律需要进一步探索。

3.2. 湘江流域各城市空间组合及耦合协调特征

3.2.1. 湘江流域各城市耦合协调度空间分异及组合

为揭示湘江流域各市州耦合协调度空间分异及组合特征，根据式(8)计算出各城市耦合协调度的多年平均值，并采用 ArcGIS 的 Jenks 分类法将结果分为三级(图 3)。从空间视角可知：株洲、长沙、永州耦合协调度较高，郴州、岳阳、衡阳、娄底次之，湘潭最低。从图 4 可知，各市州人口城镇化水平与耦合协调度并无明显的对应

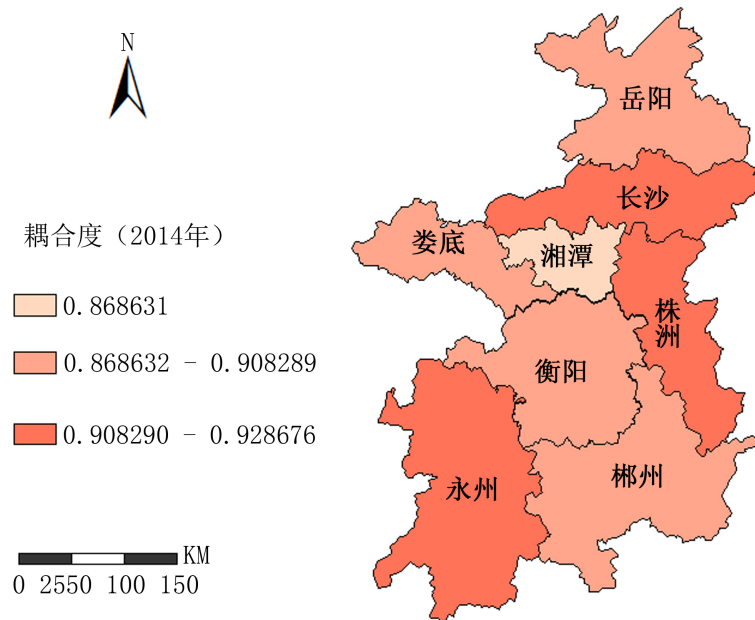


Figure 3. Spatial distribution of coupling coordination degrees in the Xiangjiang River basin in 2014

图 3. 2014 年湘江流域城市化系统与水资源环境系统耦合协调度空间分布

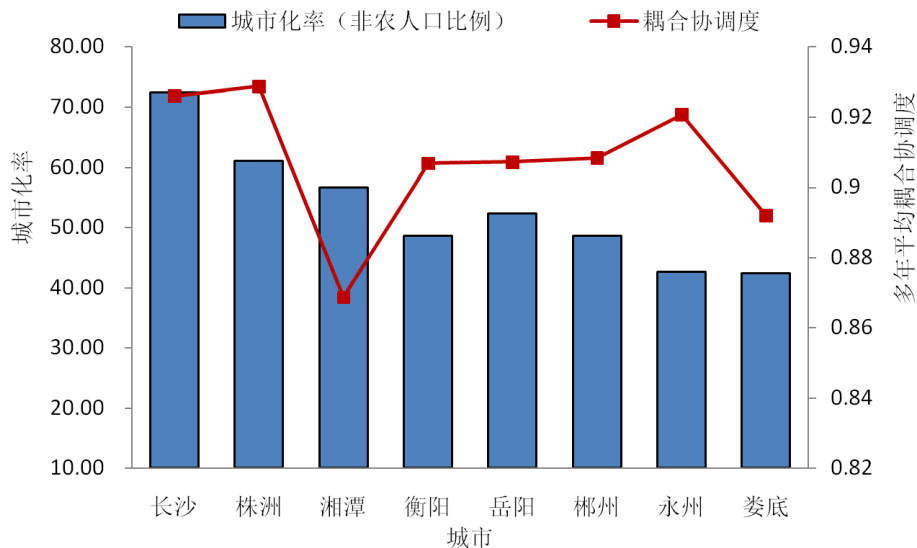


Figure 4. Coupling coordination degree and urbanization rate of cities across the Xiangjiang River basin in 2014

图 4. 湘江流域各市州城市化水平与 2014 年耦合协调度

关系。因此根据耦合协调度和城镇化水平,对流域内城市进行空间组合,其中娄底属于低城市化中耦合协调,永州属于低城市化高耦合协调,湘潭属于中城市化低耦合协调,岳阳、衡阳、郴州属于中城市化中耦合协调,长沙、株洲属于高城市化高耦合协调。

3.2.2. 湘江流域各城市耦合协调度空间组合变化特征

湘江流域各市州城市化水平与耦合协调度空间组合变化如图 4 所示,根据其空间差异及变化特征划分结果如下:

1) 低城市化中耦合协调——娄底市。娄底市作为流域内发展历史较短的城市,城市化进程滞后。2014 年娄底市人均 GDP 仅为流域平均水平的 64%;经济结构落后,第三产业占 GDP 比重 32% (流域平均水平 36%),为全流域最低;产业结构不协调、资源优势难以维继等因素限制了娄底经济社会的长足发展。水资源环境方面,娄底市有涟水、资水流经境内,加之降水充沛,水资源丰度大。此外,由于娄底市人均综合用水量相对较小,水资源环境负荷较小,城市化与水资源环境耦合关系处于中等协调状态。

2) 低城市化高耦合协调——永州市。由于地处湘江流域上游,地貌复杂、山地居多,基础设施不完善,永州市城市化水平相对较低(43%),2014 年人均 GDP 仅为全省平均水平的 1/2。该市境内有湘江、珠江、资江三大河流,是全流域水资源丰度条件最好的市州。由于工业规模小(工业总产值为长沙的 11.6%),水资源年消耗量和污水排放量处于全流域最低水平,仅为长沙市的 15.2%。加之城市规模较小、人均耗水量低,因此永州市城市化与水资源环境耦合关系呈高度协调状态。

3) 中城市化低耦合协调——湘潭市。该市建成区面积为全流域最小,受产业结构不合理等问题的制约,湘潭城市化水平为“长株潭”城市群的最低谷。其中心城区规模以上工业企业数量居全省第一,为株洲的 2 倍多,但利润不及株洲 1/2。加之污水处理设施建设长期投入不足,污水处理厂处理能力仅为株洲的 1/2。因此,湘潭市城市污水年排放总量大,仅次于长沙市,万元 GDP 污水排放量为全流域最高。经济发展模式落后导致水环境负荷过重,以致使城市化与水资源环境耦合关系呈低耦合协调的状态。

4) 中城市化中耦合协调——郴州、衡阳、岳阳。三市分别处于全流域上中下游地区,水资源本底条件优越,水利工程建设投资较高,大中小型水库数量仅次于永州市。郴州、衡阳、岳阳三市的环保产业单位数和收入均居全流域前列,污水处理率较高,水资源环境抗逆能力较高。因此岳阳、衡阳、郴州三市城市化与水资源环境耦合关系属中等协调。

5) 高城市化高耦合协调——长沙、株洲。长沙、株洲作为湖南经济发展和科技创新的龙头,城市化水平位居全省前列,二市水资源利用效率高,万元 GDP 用水量全流域最低水平。水资源环境治理能力强,污水处理率分居全流域一、二位;水资源保障能力强,城市供水综合生产能力和供水管道长度均居全流域一、二位。因此,长沙、株洲二市的城市化与水资源环境耦合关系处于高度协调水平。

3.3. 湘江流域城市化与水资源环境的交互耦合的影响机制

3.3.1. 城市化与水资源环境系统之间的驱动因素

基于灰色系统理论,利用公式(9)和(10)计算系统间灰色关联度,对城市化系统与水资源环境系统的影响因素进行测度分析,探讨各市州约束城市化发展、胁迫水资源环境的主要因素。

1) 制约城市化发展的主要因素

长沙、株洲、湘潭三市水资源环境系统指标对城市化系统的灰色关联度多小于 0.5,属较弱相关。水资源环境对城市化系统的约束作用主要体现在供水能力、供水设施、人均水资源量、环境负荷等方面。可见长株潭地区整体发展水平较高,供水设施完备,供水能力强,城市发展受水资源本底条件的约束较少;但人口增长速度与资源配套速度的矛盾仍然存在,水环境污染的问题亟待解决。因此三市的水资源规划利用应侧重人均水资源

的分配,进一步加强水质监测,尽快完成产业转型升级,促进城市化与水资源环境的协调发展。

衡阳、岳阳两市的主要约束因素为供水设施和环境压力,环境压力主要源自生产用水总量。这与衡阳、岳阳两市耗水企业产值占较大经济比重的经济发展模式密切相关。两市区共有造纸厂 80 余家;在岳阳 8 家上市公司中,有 6 家为高耗水型工业;衡阳钢铁行业规模也十分可观。另外,衡阳城市化发展受水库数量影响较大。因此,二市一方面应鼓励企业进行节水技术开发,最大限度的减少排水量;另一方面应进一步加强水利设施建设,以增强对水资源的时空调控和供水保障能力。

永州、郴州、娄底城市化系统主要受环境治理和环境负荷的影响,基本符合其资源型城市特征。另外,娄底城市化水平受到有效灌溉面积的制约,反映了娄底作为资源型城市的同时,农业仍占较大经济比重的特点。因此,三市应努力建立健全资源开发补偿机制和衰退产业转型援助机制,进一步加强水污染防治工作,改善水资源环境。

2) 胁迫水资源环境的主要因素

总体而言,水资源环境的主要胁迫因素为人口规模、人口结构和科技文化水平。人口集聚对水资源的直接影响为水资源的减少,而随之而来的供水压力对水资源分配的影响,则间接改变了水环境功能。

其中,长沙、株洲、岳阳的水资源环境系统主要受城市科技文化水平和人口结构的影响。随科学技术水平的提升,株洲万元 GDP 污水排放量从 $114.92 \text{ m}^3/\text{万元}$ 下降至 $6.59 \text{ m}^3/\text{万元}$,岳阳从 $41.2 \text{ m}^3/\text{万元}$ 下降至 $4.68 \text{ m}^3/\text{万元}$ 。株洲与岳阳的生产用水量分别下降了 85.7% 和 87.7%,与二市偶和协调度增大的趋势相吻合。长沙由于城市化率比其他市州高 11.3%~30.1%,因此其水资源环境受到农村从业人口的影响最小。

湘潭、衡阳、永州的水资源环境系统的主要胁迫因子为经济总量和人口结构。随着人口特别是城市人口的大幅增加,衡阳 2014 年的总用水量增长为 2000 年的 1.14 倍,城市污水总排放量增长为 2000 年的 6 倍,湘潭、永州的耗水量亦有一定程度的增长,对水资源产生了数量和质量上的胁迫。

郴州、娄底的水资源环境系统主要受经济总量和经济结构的胁迫。二市在资源衰竭后处于转型阵痛期,经济下行压力大;与此同时,由于重污染企业的关停整改,水环境治理日见成效,娄底污水处理率上升了 30.93%,永州的增幅更达到了 64.64%。

3.3.2. 城市化与水资源环境系统内驱动因素

1) 城市化发展综合水平

城市化综合发展水平的驱动因子通过指标权重来判别,权重越大说明对城市化发展的影响越大。从图 5 可以看出,湘江流域城市化水平的 4 个分量中,影响最大的均为经济城市化,除湘潭外所占权重均在 0.4~0.5 之间。这说明各市州的城市化进程主要依赖于经济规模的扩张,包括地区生产总值的增加、第三产业发展带来的产业结构优化。

2) 水资源环境综合水平

从图 6 可知,湘江流域各市州水资源系统中权重最大的均为水资源水平,说明湘江流域水资源的本底条件乐观,且总体符合从流域上游到下游水资源本底条件逐渐提高的趋势。其中,水资源水平所占权重最低的为永州(0.3667),这主要是由于永州虽有湘江、桂贺、资水三大水系,但年径流深和降水的高值区主要集中于南岭、旁都岭等山区,水资源难以利用。

全流域水资源环境压力所占权重普遍大于水资源环境响应,说明湘江流域水资源环境的污染问题十分严重,水资源治理缓慢,水环境抗逆能力普遍偏低。这主要是由于湖南省是我国有色金属主产地,湘江流域是湖南省重化工业的集中分布地带,粗放经济发展模式对环境产生了危害。以 2014 年为例,湘江流域 8 市城市污水排放量超过污水处理能力 9842.00 万 m^3 。为此,各市州应该树立“五位一体”的科学发展观,加大治理力度,转水环境污染现状。

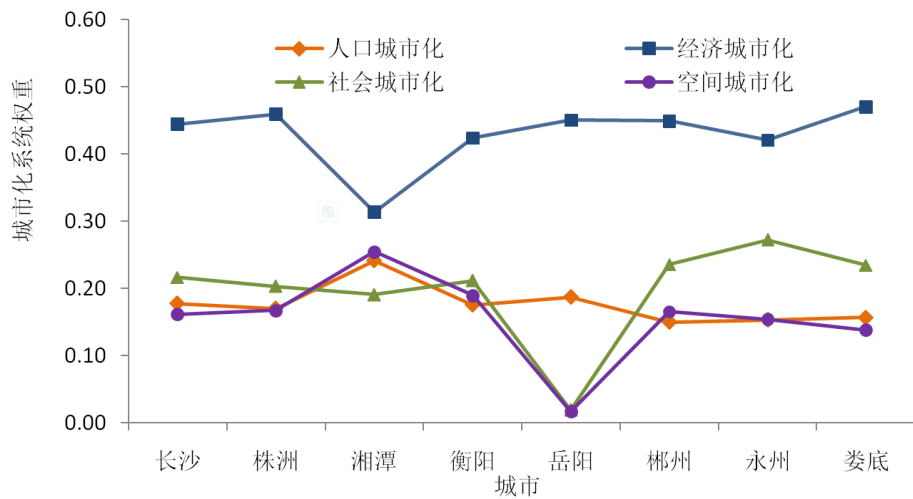


Figure 5. Urbanization system weights of cities across the Xiangjiang River basin
图 5. 湘江流域各市州城市化系统权重

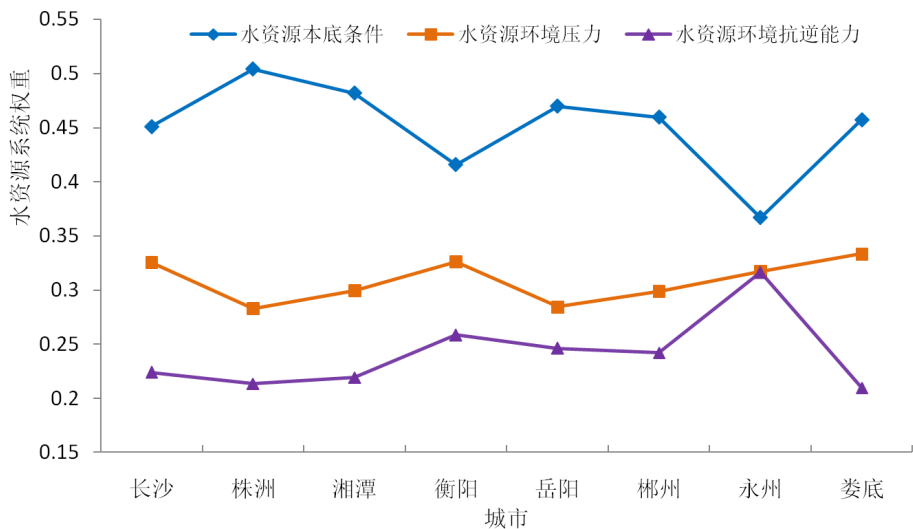


Figure 6. Water resources and environment system weights of cities across the Xiangjiang River basin
图 6. 湘江流域各市州水资源环境系统权重

4. 结论与讨论

- 1) 湘江流域 2000~2014 年城市化进程与水资源的协调关系整体趋向优化, 但局部存在波动。在该背景下, 研究区城市化与水资源环境耦合的内部机制有待进一步完善。
- 2) 湘江流域各市州城市化发展水平和耦合协调度具有明显的空间分异。根据人口城镇化水平和耦合协调度, 将湘江流域各市州分为 5 种类型, 并为流域内水资源调配和生态补偿的实施提供决策依据。
- 3) 湘江流域城市化与水资源环境耦合协调机制呈现出交互耦合的复杂关系。就系统内部指标而言, 水资源环境的取决于水资源本底条件, 受制于资源丰度和人均水平; 经济城市化是湘江流域城市发展的主导因素, 受工业规模和产业结构影响。就系统间指标而言, 供水设施和环境压力是城市化发展的主要约束因素, 人口结构是水资源环境的主要胁迫因素。在湘江流域一般机制下, 各市州的驱动机制呈现出一定的地域差异。

致 谢

感谢国家大学生创新创业训练计划对此研究的资金支持。

基金项目

2016 年国家级大学生创新创业训练计划项目(201610542014)。

参考文献 (References)

- [1] 方创琳, 孙心亮. 河西走廊水资源变化与城市化过程的耦合效应分析[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 2-9.
FANG Chuanglin, SUN Xinliang. Coupling effects between water resources change and urbanization process in Hexi Corridor of Northwest China. *Resources Science*, 2005, 27(2): 2-9. (in Chinese)
- [2] LETTENMAIER, D. P., WOOD, A. W., PALMER, R. N., et al. Water resources implications of global warming: A U.S. regional perspective. *Climatic Change*, 1999, 43(3): 537-579.
- [3] VÖRÖSMARTY, C. J., GREEN, P., SALISBURY, J., et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [4] RHODES, A. L., NEWTON, R. M. and PUFALL, A. Influences of land use on water quality of a diverse New England watershed. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(18): 3640.
- [5] 方创琳, 黄金川, 步伟娜. 西北干旱区水资源约束下城市化过程及生态效应研究的理论探讨[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 1-7.
FANG Chuanglin, HUANG Jinchuan and BU Weina. Theoretical study on urbanization process and ecological effect with the restriction of water resource in arid area of northwest China. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 1-7. (in Chinese)
- [6] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 237-247.
LIU Yaobin, LI Rendong and SONG Xuefeng. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 237-247. (in Chinese)
- [7] ALCAMO, J., FLÖRKE, M. and MÄRKER, M. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 2007, 52(2): 247-275.
- [8] DESSU, S. B., MELESSE, A. M., BHAT, M. G., et al. Assessment of water resources availability and demand in the Mara River Basin. *Catena*, 2014, 115(3): 104-114.
- [9] 汪慧贞, 李宪法. 北京城区雨水径流的污染及控制[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(2): 16-18.
WANG Huizhen, LI Xianfa. Pollution and control of stormwater runoff in Beijing urban area. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2002, 15(2): 16-18. (in Chinese)
- [10] 曾晓燕, 牟瑞芳, 许顺国. 城市化对区域水资源的影响[J]. 资源环境与工程, 2005, 19(4): 318-322.
ZENG Xiaoyan, MOU Ruifang and XU Shunguo. The influence of urbanization on regional water resources. *Resources; Environment and Engineering*, 2005, 19(4): 318-322. (in Chinese)
- [11] 贾绍凤, 张士锋, 杨红. 工业用水与经济发展的关系[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 2799-2284.
JIA Shaofeng, ZHANG Shifeng and YANG Hong. Relationship between industrial water use and economic development. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3): 2799-2284. (in Chinese)
- [12] 董林, 陈璇璇. 城市可持续发展的水资源约束分析[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(8): 525-527.
DONG Lin, CHEN Xuanxuan. Water resources constraint analysis of urban sustainable development. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2006, 12(8): 525-527. (in Chinese)
- [13] 湖南省统计局. 湖南统计年鉴(2006-2014) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
Hunan Provincial Bureau of Statistics. *Hunan statistical yearbook (2006-2014)*. Beijing: China Statistics Press, 2006-2014. (in Chinese)
- [14] 康慕谊. 城市生态学与城市环境[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997: 345-346.
KANG Muiyi. *City ecology and city environment*. Beijing: Chinese Metrology Press, 1997: 345-346. (in Chinese)
- [15] FAO Proceedings. Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development. Proceedings of the Workshop Organized by the Land and Water Development Division FAO Agriculture Department, 1997, 2: 5-5.
- [16] WALZ, R. Development of environmental indicator systems: Experiences from Germany. *Environmental Management*, 2000, 25(6): 613-623. <https://doi.org/10.1007/s002670010048>
- [17] 李静芝, 朱翔, 李景保, 等. 洞庭湖区城镇化进程与水资源利用的关系[J]. 应用生态学报, 2013(6): 1677-1685.
LI Jingzhi, ZHU Xiang, LI Jingbao, et al. The relationship between urbanization process and water resources utilization in

- Dongting Lake area. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013(6): 1677-1685. (in Chinese)
- [18] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2004.
ZHUANG Chuqiang, WU Yasen. Application of mathematical statistics basis. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [19] SHAW, P. J. A. Multivariate statistics for the Environment Sciences. A Hodder Arnold Publication, 2003: 38.
- [20] 邓聚龙. 社会经济灰色系统的理论与方法[J]. 中国社会科学, 1984(6): 47-60.
DENG Julong. Theory and method of socio economic grey system. Chinese Social Sciences, 1984(6): 47-60. (in Chinese)