

云南省城市化与水资源系统耦合协调的 时空格局及形成机理

陈锡才¹, 彭燕梅¹, 段正洋¹, 裴子誉², 王学良¹, 许永涛¹, 潘玉君³

(1. 楚雄师范学院 资源环境与化学学院, 云南 楚雄 675000;

2. 利兹大学 地理学院, 英国 利兹 LS29JT; 3. 云南师范大学 地理学部, 昆明 650500)

摘要:为揭示城市化与水资源系统耦合协调的内在规律,以云南省为研究区域,运用指标体系构建、纵横向拉开档次法和耦合协调模型等方法探究了城市化与水资源系统耦合协调的时空格局及形成机理。结果表明:(1) 2010—2017 年,云南省城市化与水资源系统处于初级耦合协调状态。(2) 2010 年,唯一的基本协调类型分布在滇中地区的昆明市;中度协调类型零星分布;轻度失调类型独占滇西北地区的迪庆州;初级协调类型主要分布在滇西、滇西南和滇东南地区。(3) 2015 年较 2010 年发生了显著的变化。滇西北地区成对出现轻度失调类型;滇中和滇南地区集中分布中度协调类型。(4) 2017 年较 2015 年有了新的变化。滇西地区的临沧市首次出现中度协调类型;滇东地区不再有多度协调类型的分布;滇东、滇西和滇西南地区集中分布着初级协调类型。其形成机理为:(1) GDP 影响着城市化水平。(2) 城市化水平和水资源系统共同决定着云南省耦合协调度的时空演变。(3) GDP 和水资源系统指数的区域差异导致了耦合协调度的区域差异。综上,云南省城市化与水资源系统耦合协调的空间格局发生了演变,存在着 3 个方面的演变机制。

关键词:城市化系统;水资源系统;耦合协调;时空格局;云南省

中图分类号:F291.1; F323.213

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0408-08

Temporal and Spatial Pattern and Its Formation Mechanism of the Coupling Coordination Between Urbanisation and Water Resources System in Yunnan Province

CHEN Xicai¹, PENG Yanmei¹, DUAN Zhengyang¹, PEI Ziyu²,

WANG Xueliang¹, XU Yongtao¹, PAN Yujun³

(1. School of Resource and Environment and Chemical Science, Chuxiong Normal

University, Chuxiong, Yunnan 675000, China; 2. School of Geography, University of Leeds,

Leeds LS29JT, UK; 3. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to reveal the inherent laws of the coupling coordination state between urbanisation and water resources system, Yunnan Province was taken as an object of study. The temporal and spatial pattern and its formation mechanisms in relation to the coupling coordination between urbanisation and water resources system were explored by using methods of: the construction of indicator system, vertical-and-horizontal scatter-degree and the coupled coordination model. The results show that: (1) The urbanisation and water resources system in Yunnan Province from 2010 to 2017 is in a primary coupled coordination state. (2) In 2010, the sole type of basic coordination layed in Kunming City in Central Yunnan Province; the moderate coordination type scattered in different regions; the slightly imbalanced coordination type dominates Diqing Tibetan Autonomous Prefecture of the northwest of Yunnan Province; the primary coordination type was distributed among the regions of the west, southwest and southeast of Yunnan Province.

收稿日期: 2021-08-10

修回日期: 2021-09-05

资助项目: 国家自然科学基金(41261033); 云南省地方高校联合专项青年项目(202001AP070044); 云南省教育厅资助项目(2019J0397); 云南省教育厅资助项目(2022J0846); 楚雄师范学院博士科研启动基金(JBS2002)

第一作者: 陈锡才(1981—), 男, 云南楚雄人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事资源环境与区域发展研究。E-mail: 445026135@qq.com

通信作者: 段正洋(1990—), 男, 云南楚雄人, 博士, 讲师, 主要从事环境污染与防治、资源与可持续发展研究。E-mail: zyduan@cxct.edu.cn

潘玉君(1965—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 主要从事资源与可持续发展研究、理论地理学研究。E-mail: 13888346995@139.com

(3) Compared with 2010, there is an obvious change in the distribution of the spatial coupling coordination in 2015. The northwest of Yunnan Province witnessed a slightly imbalanced coordination type, and the moderate coordination type gathered in the central and south of Yunnan Province. (4) Compared with 2015, the spatial pattern of coupling coordination took on new changes in 2017. The moderate coordination type first appeared in Lincang City in the west of Yunnan Province. There was no moderate coordination type in the east of Yunnan Province. The primary coupled coordination type was distributed among the regions of the east, west and southwest of Yunnan Province. Their formation mechanisms included three aspects. First, the GDP affected the level of urbanisation. Second, the GDP and urbanisation jointly determined the temporal and spatial evolution of the coupling coordination in Yunnan Province. And third, the regional differences of GDP and water resources system index lead to the regional difference of coupling coordination. To sum up, the spatial pattern of the coupling coordination between urbanisation and water resources system in Yunnan Province has evolved with three evolutionary mechanisms.

Keywords: urbanisation system; water resources system; coupling coordination; spatial-temporal pattern; Yunnan Province

城市化是实现现代化的重大战略选择和推动经济增长的持续动力^[1],在很大程度上能够改善民生,能够促进区域增长极的形成,因此,云南省城市化进程的推进对自身社会经济的发展具有重要意义。然而云南省在推进城市化的进程中,客观存在着水资源与城市化系统的耦合协调关系问题,两系统协调与否影响着城市化的演进,因为水资源是城镇化建设中重要的战略性自然资源,限制着城镇化发展的速度和方向^[2],因此,云南省城市化与水资源系统之间的耦合协调状态研究有一定的意义。关于城市化与水资源系统关系研究,国外学者的关注点为水资源系统对城镇化系统的支撑能力^[3]和城镇化系统对水资源系统的影响^[4]。国内学者的研究焦点为:(1)水资源系统对城市化系统演进的约束研究,探究水资源系统约束的涵义以及城市化推进过程中水资源系统约束类型的分类^[5-7]。(2)水资源约束下的城市发展,探讨降水稀少区水资源约束下的城镇发展机制、时空格局和城镇化正向演进模式^[8-9]。(3)水资源系统与城市化系统内在关系研究,探讨两系统之间的响应机制和耦合协调状态^[10-13]。然而,以往的研究有不足之处或者可以尝试新的研究视角:(1)在测度土地城市化时采用建成区面积,未采用土地城市化率。(2)指标体系赋权时采用层次分析法或者熵值法。多年多地区的数据具有面板数据的特性,宜采用纵横向拉开档次法赋权。(3)采用建成区面积与国土面积之商表征土地城市化率,这种指标的表征方法有需要完善的地方,因为不是所有的国土面积都能用于城市化,例如基本农田、坡度较大的国土面积和生态保护红线区等。综上,结合云南省“山地多、平地少”的独特地理条件,笔者拟构建能够客观反映研究区地理特点的城

市化与水资源指标体系。在测度土地城市化时,基于土地城市化的内涵即“土地城市化是由于区域在城镇化进程中,农业用地转变为城市建设用地的过程”,采用土地城市化率指标进行测度,这里的土地城市化率指标与传统的不同,由公式 $LUI=A/(B-C-D)$ 计算而来,式中: LUI 为土地城市化率; A 为建成区面积; B 为国土面积; C 为“坡度 $\geq 25\%$ ”的国土面积; D 为基本农田面积。在测度环境城市化时,采用建成区绿化覆盖率进行表征。文中的环境城市化仅狭义地指建成区的绿化情况,不包括大气、水体的情况,较高的绿化率能够提升人们的生活品质和城市的宜居性。在城市化和水资源系统指标体系构建好之后,采用纵横向拉开档次法赋权。根据赋权结果计算出城市化指数和水资源系统指数之后,用耦合协调模型测度云南省两系统之间的耦合协调状态,进而探索云南省耦合协调的时空格局及形成机理^[14-15]。基于形成机理提出对策,以期相关部门决策提供参考。

1 研究方法数据来源

1.1 研究方法

云南省城市化与水资源系统耦合协调时空分析,主要采用指标体系构建、纵横向拉开档次法、耦合协调模型和变异系数分析法等研究方法。

(1) 指标体系构建。城市化与水资源系统是两个复杂的子系统,关于两个系统的评价,不同学者构建的评价体系有所不同,因此学术界尚未形成一个通用于我国各省份的城市化和水资源系统评价体系。为了全面、深层次地分析云南省两系统的耦合协调状态,在参考马海良^[2]、张胜武^[10]和乔标^[16]等研究的基础上,结合云南省实际情况,将云南省的城市化系统

从人口、经济、土地和环境城市化 4 个方面进行综合评价,水资源系统从水资源本底、水资源用水负荷、水资源环境压力和水资源环境抗逆能力 4 个方面进行

综合评价。在选择具体的指标时,遵循系统性、科学性、可比性和数据可获得性等原则,最终构建出指标体系(表 1)。

表 1 云南省城市化和水资源系统指标体系

系统层	准则层	指标层	指标权重	指标属性
城市化系统综合评价体系	人口城市化	城镇人口与总人口的占比	0.5178	正向
	经济城市化	二产产值与总产值的比值	0.0064	正向
		三产产值与总产值的比值	0.0219	正向
	土地城市化	土地城镇化率	0.276	正向
	环境城市化	建成区绿化覆盖率	0.1779	正向
水资源系统综合测评体系	水资源本底	水资源量	0.021	正向
		人均水资源量	0.0113	正向
		工业用水总量	0.1374	逆向
	水资源用水负荷	城镇居民生活人均用水量	0.0839	逆向
		城镇污水排放量	0.2615	逆向
	水资源环境压力	城镇污水处理率	0.0094	正向
		万元 GDP 用水	0.1989	逆向
	水资源环境抗逆能力	万元工业增加值用水	0.1617	逆向
		农业灌溉单位面积用水量	0.1149	逆向

(2) 纵横向拉开档次法。在选取的指标中,不同指标对整个评价系统的贡献度存在着差异,所以选用科学的方法对指标进行赋权至关重要。纵横向拉开档次法^[17]是一种适用于面板(平行)数据和完全基于客观数据的综合评价方法,实现步骤如下:

首先,取综合评价的函数。

$$y_i(t_k)=\sum_{j=1}^m\omega_jx_{ij}(t_k)$$

($i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m;k=1,2,\cdots,T$) (1)
式中: $x_{ij}(t_k)$ 为在 t_k 时间上第 i 个评价对象的第 j 个指标值; ω_j 为第 j 个指标的权重; $y_i(t_k)$ 为第 i 个评价对象在 t_k 时间的综合得分。

其次,确定指标权重 $\omega_j(j=1,2,3,\cdots,m)$ 。
令 $y_i(t_k)$ 的总离差平方和 $\sigma^2=\sum_{k=1}^T\sum_{i=1}^n[y_i(t_k)-\overline{y}]^2$ 取到最大值。进行原始数据的无量纲化处理后,有

$$\overline{y}=\frac{1}{T}\sum_{k=1}^T[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^m\omega_jx_{ij}(t_k)]=0$$
 (2)

因此公式(3)成立。

$$\sigma^2=\sum_{k=1}^T\sum_{i=1}^n[y_i(t_k)]^2=\sum_{k=1}^T(W^TH_kW)=W^T\sum_{k=1}^TH_kW=W^THW$$
 (3)

其中, $W=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_m)^T,H=\sum_{k=1}^TH_k$ 是一个 $m\times n$ 的对称矩阵, $H_k=X_k^TX_k(k=1,2,\cdots,T)$ 。

$$X_k=\begin{bmatrix}x_{11}(t_k)&\cdots&x_{1m}(t_k)\\ \vdots&&\vdots\\ x_{n1}(t_k)&\cdots&x_{nm}(t_k)\end{bmatrix}$$
 (4)

若限定 $WW^T=1$,则矩阵 H 的最大特征值对应

的特征向量 W 即为权重系数,此时 σ^2 取最大值。

根据公式(3)—(4),采用 MATLAB 进行运算,最终得到城市化和水资源系统的指标体系权重(表 1)。

(3) 耦合协调度模型构建。研究需探讨云南省城市化与水资源系统耦合协调度,故构建耦合协调度模型。耦合概念来源于物理学^[18],是指各系统通过相互影响带动彼此良性互动的过程,各系统间存在动态关联性^[19]。协调是指系统内部各要素之间或系统间存在“和谐一致”“配合得当”的相互联系^[20]。由于城市化与水资源系统具有交错、动态性和不平衡性,仅探讨两个系统之间的耦合度并不全面^[2],故而在探讨两系统的耦合度和协调度的基础上进一步探讨耦合协调度。耦合协调度是在协调的基础上,为了更准确地反映两个系统的整体协同效应而提出的概念^[21]。建模分为 3 个步骤^[2,22],一是构建城镇化与水资源系统的耦合度模型,二是构建综合调和指数模型,三是构建耦合协调度模型。模型如下:

耦合度函数:

$$C=\sqrt{\frac{f(u)\times f(w)}{[f(u)+f(w)]^2}}$$
 (5)

综合调和指数:

$$T=af(U)+bf(W)$$
 (6)

耦合协调度:

$$D=\sqrt{C\times T}$$
 (7)

式中: C 为两系统的耦合度; $f(U)$ 与 $f(W)$ 分别为城镇化系统与水资源系统综合评价指数; T 为两系统的调和指数,反映两系统的整体协同状态; a 和 b 为

待定系数,且 $a+b=1$,由于两系统重要性一致,因此取值 $a=b=0.5$; D 为耦合协调度,取值范围为 $0\sim1$, D 值越大,代表两系统耦合协调度越高。

将城市化与水资源系统的耦合度分为 6 个层次^[2]:当 $C=0$ 时,两系统耦合度极低、无序发展;当 $0<C\leq0.3$ 时,两系统处于低水平耦合阶段,此时城市化系统对水资源系统产生的负效应较小,水资源系统能够承载相应

的负效应;当 $0.3<C\leq0.5$ 时,两系统关联性增强,水资源系统对城市化系统支撑度增强,而城市化对水资源系统依赖程度增加;当 $0.5<C\leq0.8$ 时,两系统逐渐相互适应、协调;当 $0.8<C\leq1.0$ 时,两系统相互促进、协调发展,两系统高度耦合;当耦合度接近 1 时,系统耦合度处于最佳状态。根据 D 值可以将两系统的耦合协调状态分成 4 大类 12 小类(表 2)。

表 2 城市化与水资源系统耦合协调状态

耦合协调度 D	$f(U)$ 与 $f(W)$	耦合协调类型与特征
$0<D\leq0.4$ (失调阶段)	$f(U)>f(W)$	重度失调,城市化系统演进超出水资源系统、系统衰退
	$f(U)=f(W)$	中度失调,两系统同步演进,但演进程度低,系统状态差
	$f(U)<f(W)$	轻度失调,城市化演进滞后于水资源系统的演进
$0.4<D\leq0.5$ (初级耦合协调阶段)	$f(U)>f(W)$	濒临失调,城市化演进超前,水资源对城市化演进呈现出约束力
	$f(U)=f(W)$	勉强协调,两系统同步演进,演进程度略有提高
	$f(U)<f(W)$	初级协调,城市化演进滞后于水资源系统,水资源对城市化演进呈现出较高支撑度
$0.5<D\leq0.8$ (中度耦合协调阶段)	$f(U)>f(W)$	基本协调,城市化演进超出水资源系统,对水资源产生胁迫作用
	$f(U)=f(W)$	中度协调,两系统演进程度极高,系统同步演进
	$f(U)<f(W)$	中度协调,两系统演进程度极高,水资源系统高度支撑城市化系统
$0.8<D\leq1.0$ (高度耦合协调阶段)	$f(U)>f(W)$	良好协调,两系统高度演进,城市化演进略对水资源系统产生胁迫作用
	$f(U)=f(W)$	高度协调,两系统高度、同步演进,系统状态理想
	$f(U)<f(W)$	优质协调,两系统高度演进、理想发展,水资源对城市化系统演进高度支撑

(4) 变异系数分析法。耦合协调度的空间分布格局客观地揭示了耦合协调度的空间分布规律,实际上区域耦合协调度客观存在着区域差异,故采用变异系数测度云南省州(市)耦合协调度的区域差异。计算公式如下:

$$C_v=\frac{1}{\bar{x}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}\times100\%$$

(8)

式中: C_v 为变异系数; \bar{x} 为州(市)耦合协调度的平均数; x_i 为各州(市)的耦合协调度; n 为州(市)个数。

1.2 数据来源与处理

研究所需的数据主要来源于《云南省统计年鉴》(2011—2018 年)、《云南省水资源公报》(2011—2018 年)和各州(市)统计年鉴(2011—2018 年)。数据处理包括:由于城市化的各末级指标以及水资源的各末级指标量纲不同,为了能够算出城市化系统指数和水资源系统指数,以便于用耦合协调模型计算二者的耦合协调度,故采用公式(9)和(10)对数据进行无量纲化处理。

对于正向指标:

$$x'_{ij}(t_k)=\frac{x_{ij}(t_k)-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)}$$

(9)

对于逆向指标:

$$x'_{ij}(t_k)=\frac{\max(x_j)-x_{ij}(t_k)}{\max(x_j)-\min(x_j)}$$

(10)

式中: $x'_{ij}(t_k)$ 为某一年某一研究区某一指标值标准化的结果,且 $x'_{ij}(t_k)\in[0,1]$; $x_{ij}(t_k)$ 为某一年某一指标原始值; $\max(x_j)$ 和 $\min(x_j)$ 为时间序列中某一指标的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 云南省城市化与水资源系统演进分析

2010—2017 年,云南省城市化水平呈现缓慢增长的特点(图 1)。8 a 的时间,云南省综合城市化水平由 0.327 缓慢提升至 0.339,仅提升了 0.011。原因为:(1) 土地城市化由 1.348%增至 1.779%,土地城市化进程较慢;(2) 人口城市化水平由 34.81%提升到 47.81%,提升了 13 个百分点,年平均增速仅为 1.6%,进程缓慢;(3) 经济城市化由 84.65%增至 85.16%,仅增加了 0.51%,增幅较小;(4) 建成区绿化覆盖率由 30.9%缓升至 38.15%,年平均增幅仅为 0.9%。这些缓慢的进程与云南省严格保护永久基本农田、存在生态脆弱区、严守生态保护红线、未进行大规模的工业活动以及经济落后有关。与缓慢推进的城市化进程相比,水资源系统的演进也显得差强人意(图 1)。在 8 a 的时间里,水资源系统演进较为缓慢并经历了 3 个阶段:(1) 2010—2011 年的正向演进阶段,这主要归因于城镇污水处理率的提高、万元 GDP 用水量 and 万元工业增加值用水量的减少。(2) 2011—2015 年的逆

向演进阶段,即2011年以后水资源系统指数呈现递减的特点,这主要归因于城市污水排放量的逐年递增。(3)2016—2017年的正向演进阶段,即2015年以后水资源系统指数递增,这主要是受到水资源量增加、工业用水量和万元GDP用水量减少等因素的影响。根本原因为云南省部分水利工程的竣工以及工业生产节水效果初显。总体来说,通过图1可以发现,2010—2017年云南省城市化与水资源系统演进大致处于同步状态,水资源系统指数高于城市化指数,这意味着水资源系统对城市化有较高的支撑。

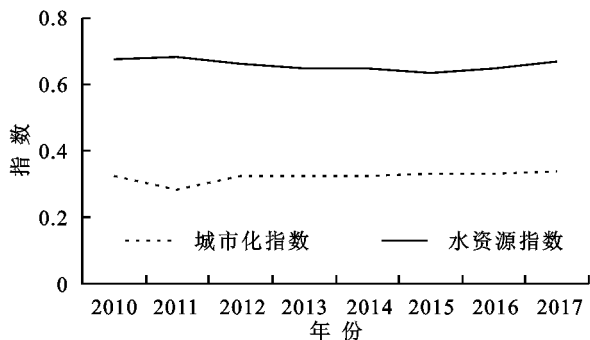


图1 云南省城市化与水资源系统指数的年际变化

2.2 云南省城市化与水资源系统耦合协调动态

为了探究云南省城市化与水资源系统的耦合协调状态,计算出两系统的耦合度和耦合协调度进行系统分析。耦合度能够反映两系统内部的依赖程度,2010—2017年,两系统的耦合度在0.455~0.475。这8a的时间里,两系统的耦合经历了4个阶段(图2):(1)2010—2011年,耦合度急剧下降。(2)2011—2012年,耦合度直线式增加,且该直线的斜率较大。(3)2012—2015年,耦合度缓慢上升。(4)2015—2017年,耦合度平稳下降。综上,研究时段内,云南省水资源与城市化系统处于中度耦合状态,即云南省城市化未对水资源系统产生强烈的依赖作用,而水资源系统未对云南省城市化产生显著的约束作用。耦合度反映了两系统的相互影响程度,但是无法表征系统协调状态,而耦合协调度能够表征两个子系统的协调状态。2010—2017年,云南省城市化与水资源系统的耦合协调度在0.47~0.488,两系统处于初级协调状态,这反映出云南省城市化系统演进滞后于水资源系统演进,水资源对城市化演进呈现出较高的支撑度。研究时段内,云南省两系统的耦合协调度演进经历了4个阶段(图2):(1)2010—2011年,耦合协调度急剧下降阶段。这主要是因为2011年曲靖市、保山市、丽江市、楚雄州和西双版纳州等州(市)的综合城市化水平较2010年有所下降的缘故。(2)2011—2012年,耦合协调度急剧上升阶段。产生这一阶段的原因为2012年曲靖市、保山市、普洱市、临沧市、楚雄州、红河州、西双版纳州、大理州

和德宏州等州(市)的综合城市化水平较2011年显著提高以及水资源系统演进极其缓慢。(3)2012—2016年,耦合协调度平稳上升阶段。综合城市化水平缓慢提升以及水资源系统指数缓慢下降是主因。(4)2016—2017年耦合协调度显著上升阶段。综合城市化水平以及水资源系统指数明显上升是主因,根本原因为云南省经济的增长、工业生产技术的提高导致节水效果显著以及水利设施的建设。

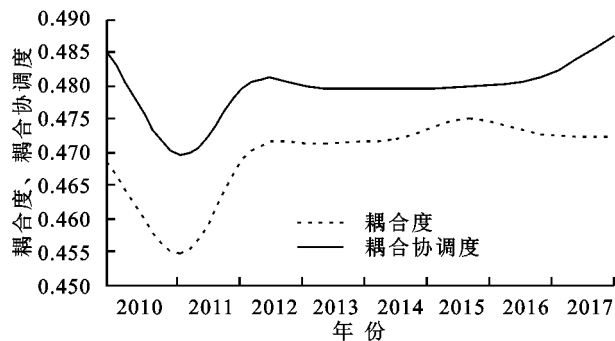


图2 云南省城市化与水资源系统耦合度和耦合协调度的年际变化

2.3 云南省城市化与水资源系统耦合协调的空间演变及机理

城市化与水资源系统耦合协调度作为一种人文地理现象,其存在着客观的空间分布格局,并且空间分布格局随着时间的推移而演变,这种空间演变有着相应的演变机制。

2.3.1 云南省城市化与水资源系统耦合协调的空间演变规律

(1)2010年是“十一五”时期的最后一年,这一年,云南省的城市化与水资源系统耦合协调空间分布存在显著的特点(图3A)。唯一的基本协调类型分布在滇中地区的昆明市;中度协调类型分布在滇东地区的曲靖市和滇中地区的玉溪市,呈现出零星分布的特点;轻度失调类型独占滇西北地区的迪庆州;初级协调类型主要分布在滇西、滇西南和滇东南地区,呈现出成片分布的特征。此外,该类型在滇东北地区的昭通市也有分布。就整个云南省而言,基本协调的区域数量为1个,中度协调的区域数量为2个,初级协调的区域数量为12个,轻度失调的区域数量为1个,这反映出云南省大部分州(市)的城市化演进滞后于水资源系统,水资源系统对城市化演进呈现出较高支撑度。

(2)2015年是“十二五”时期的最后一年,这一年,云南省的城市化与水资源系统耦合协调的空间分布较2010年发生了显著的改变(图3B)。经过5a的演进,怒江州的耦合协调度属性发生了根本性的变化,由初级协调类型演变为轻度失调类型,这反映出怒江州的城市化水平偏低,城市化演进滞后于水资源

系统的演进;迪庆州依旧属于轻度失调类型,与怒江州成对占据滇西北地区;唯一的基本协调类型依旧分布在滇中地区的昆明市;滇南地区的红河州耦合协调属性发生了根本性的变化,由初级协调演变为中度协调类型,这反映出红河州的城市化与水资源系统演进水平较高;滇东地区的曲靖市和滇中地区的玉溪市耦合协调属性未发生根本性的改变,依旧属于中度协调类型;其余州(市)依旧为初级协调类型区。就整个云南省而言,基本协调的区域数量为1个,中度协调的区域数量为3个,初级协调的区域数量为10个,轻度失调的区域数量为2个,这反映出云南省大部分州(市)城市化与水资源系统耦合协调状态依旧不理想,城市化水平有待提高。

(3) 2017年是“十三五”时期的第二年,这一年,云南省的城市化与水资源系统耦合协调的空间格局较2015年发生了显著的变化(图3C)。由于临沧市

由初级协调类型向中度协调类型转变,导致中度协调类型首次在滇西出现,这种转变反映出临沧市城市化与水资源系统的关系向良好状态演变;玉溪市和红河州依旧属于中度协调类型。而曲靖市耦合协调类型发生了根本性的改变,由中度协调类型演变为初级协调类型,这反映出曲靖市的城市化与水资源系统演进发生了倒退;轻度失调类型依旧占据滇西北地区的迪庆州和怒江州,这反映出这两个州的城市化水平依旧偏低;基本协调类型依旧分布在滇中地区的昆明市;其余地区依旧为初级协调类型区,呈现出滇东地区带状分布、滇西和滇西南集中分布的特点。就整个云南省而言,基本协调的区域数量依然为1个,中度协调的区域数量为3个,初级协调的区域数量仍然为10个,轻度失调的区域数量仍然为2个,这反映出云南省大部分州(市)水资源对城市化演进有较高支撑,大部分地区城市化水平仍然偏低。

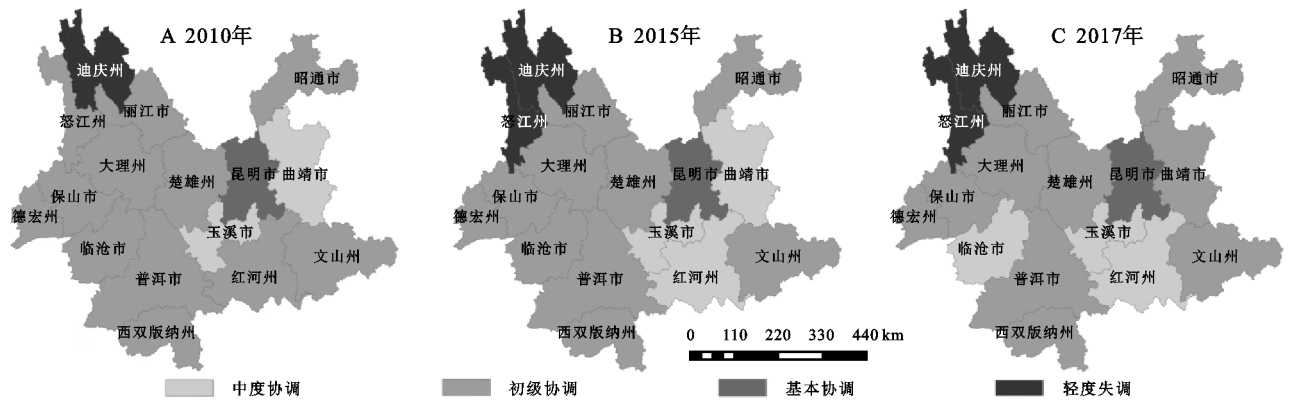


图3 2010年、2015年、2017年云南省城市化与水资源系统耦合协调度分布

(4) 纵观2010年、2015年和2017年的耦合协调空间分布图发现:① 2010年、2015年和2017年,昆明市都属于基本协调类型,城市化都对水资源系统产生了胁迫作用,而水资源系统也都对城市化产生了约束作用;② 2010年、2015年和2017年,玉溪市都属于中度协调类型,城市化与水资源系统演进程度都极高,水资源系统高度支撑城市化系统;③ 2010年和2015年,曲靖市城市化与水资源系统高度演进,水资源系统对城市化有较好地支撑。2017年,曲靖市城市化系统与水资源系统演进发生了倒退;④ 2010—2015年,红河州由初级协调演变为中度协调。2015—2017年,红河州保持中度协调,城市化与水资源系统关系状态较好;⑤ 2010年、2015年和2017年,迪庆州都属于轻度失调类型,城市化系统演进程度都极低;⑥ 2010—2015年,怒江州由初级协调演变为轻度失调。2015—2017年,怒江州依旧处于轻度失调状态。

(5) 2010年、2015年和2017年的耦合协调空间分布图在很大程度上表征了云南省城市化与水资源

系统耦合协调的时空格局特征,但是未能定量地表征耦合协调的空间分异性。空间分异性能够表征耦合协调的时空动态差异,而且耦合协调度的空间分异性也是耦合协调时空格局分析的重要方面,故对云南省耦合协调的空间分异性即区域差异进行分析。依据2010年、2015年和2017年16个州(市)域的耦合协调数据,利用变异系数分析法(公式8)计算和分析云南省3个时间节点的耦合协调空间分异性。结果表明:3个时间节点的耦合协调度变异系数值分别为0.062,0.063,0.062。这反映出云南省耦合协调度的区域差异经历了两个阶段:① 2010—2015年区域差异加剧阶段,这一时期云南省州(市)之间的耦合协调度的均衡性显著减弱;② 2015—2017年区域差异减小阶段,这一时期云南省州(市)之间的耦合协调度的均衡性显著增强。

2.3.2 云南省城市化与水资源系统耦合协调空间演变规律的形成机理 2010年、2015年和2017年云南省城市化与水资源系统耦合协调的空间分布特征变

化显著,根据耦合协调的内涵,从城市化和水资源指标体系中权重较大的指标去剖析成因。

(1) 2010年,昆明市城镇人口占比、三产产值在总产值中的占比、土地城镇化率和建成区绿化覆盖率位居全省第一,这导致城市化水平全省位居首位,而水资源拥有量却全省倒数第三,因此,水资源系统在昆明的城市化进程中表现出约束作用;迪庆州的城镇人口占比全省倒数第二,土地城镇化率全省倒数第三,建成区绿化覆盖率全省最低,导致城市化水平全省最低。城市化水平为0.095,而水资源系统指数为0.8,全省位居第四,故而迪庆州属于轻度失调类型区;曲靖市和玉溪市的城市化水平在0.38~0.41,比昆明市低0.59左右,而这两个地区却因为有丰富的水资源量以及工业生产的节约用水而导致水资源系统对城市化有较高的支撑。

(2) 2015年,昆明市的城市化水平依旧名列前茅,但因为水资源量全省倒数第三、城镇污水排放量和工业用水总量全省第一而导致水资源系统对城市化系统起约束作用;曲靖市、玉溪市和红河州因为城市化水平适中,与水资源系统很好地耦合协调,故属于中度协调类型区;迪庆州和怒江州因为经济欠发达,城市化水平偏低,故城市化与水资源系统未能很好地耦合协调,属于轻度失调类型区。

(3) 2017年,昆明市水资源系统依旧对城市化系统产生约束作用,因而昆明市依旧属于基本协调类型区;玉溪市、红河州和临沧市因为城市化系统和水资源系统演进程度极高,二者能够很好地耦合协调,故属于中度协调类型区;曲靖市不再属于中度协调类型区,而是演变为初级协调类型区,这是因为城市化和水资源系统发生了逆向演进。就城市化逆向演进而言,具体原因为城镇人口与总人口的占比较2015年降低了2.7%,而这是一个权重为0.5178的指标,此外,建成区绿化覆盖率较2015年降低了3.49%。就水资源系统逆向演进而言,水资源量较2015年减少了 $8.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。此外,曲靖市2015年工业用水总量全省位居第二位,仅次于昆明,而2017年猛增且位居16个州(市)之首;区位不理想、受到昆明市经济辐射的作用极其微弱和生态环境承载能力极弱^[23],这3个不利条件导致了迪庆州和怒江州经济落后、城镇人口占比过低、土地城市化率过低。“一落后”“两过低”和建成区绿化覆盖率极低促成了迪庆州和怒江州城市化水平全省最低。极高的水资源系统指数(怒江州0.68,迪庆州0.79)和极低的城市化水平(怒江州0.07,迪庆州0.13)使得怒江州和迪庆州的城市化与水资源系统处于轻度失调状态。

耦合协调度的区域差异是耦合协调度空间特征的重要内涵之一。2010—2015年,云南省耦合协调度的区域差异呈现加剧趋势,2015—2017年则呈现减小趋势,做如下分析:(1) 2010年,云南省16个州(市)GDP与耦合协调度的相关系数 r 为0.825,显著性水平为0.000;2015年,相关系数 r 为0.757,显著性水平为0.001;2017年,相关系数 r 为0.729,显著性水平为0.001。可见3个时段的耦合协调度与GDP的相关性十分显著,这反映出GDP通过直接影响着城市化水平而间接地影响着耦合协调度。(2) 2010年、2015年和2017年16个州(市)的GDP的变异系数分别为0.9249,0.9241,0.9887,城市化的变异系数分别为0.5286,0.4959,0.4841,水资源系统指数的变异系数分别为0.0796,0.0685,0.0530。这反映出极高的GDP区域差异导致了较高的城市化区域差异,而较高的城市化区域差异在一定的程度上造就了耦合协调度的区域差异;水资源系统指数的区域差异对耦合协调度的区域差异也具有一定的影响。

综上,GDP影响着云南省州(市)的城市化水平;城市化水平和水资源系统的变化共同决定着云南省耦合协调度的时空演变;GDP和水资源系统指数的区域差异导致了耦合协调度的区域差异。

3 结论与建议

在合理构建城市化与水资源系统指标体系、采用纵横向拉开档次法赋权和用耦合协调模型对两系统的耦合协调度进行计算的基础上,用耦合协调度判断标准对云南省层面及州(市)的耦合协调状态进行判断,从而探究云南省城市化与水资源系统的耦合协调动态和时空格局。结果表明:(1) 2010—2017年,云南省城市化与水资源系统的耦合协调度在0.47~0.488,两系统处于初级耦合协调状态,两系统的耦合协调度演进经历了4个阶段。(2) 2010年,云南省城市化与水资源系统耦合协调的空间分布存在显著的特点。唯一的基本协调类型分布在滇中地区的昆明市;中度协调类型零星分布;轻度失调类型独占滇西北地区的迪庆州;初级协调类型主要成片分布在滇西、滇西南和滇东南地区。(3) 2015年的耦合协调空间分布较2010年发生了显著的变化。滇西北地区成对出现轻度失调类型;滇中和滇南地区集中分布中度协调类型;滇西和滇西南地区片状分布初级协调类型。(4) 与2015年比较,2017年的耦合协调度空间格局有了新的变化。滇西地区的临沧市首次出现中度协调类型;滇东地区不再出现中度协调类型;初级协调类型在滇东地区带状分布,在滇西和滇西南地区

集中分布。(5)从州(市)耦合协调类型来看,2017年,昆明市的城市化进程中存在着水资源系统的约束作用;曲靖市属于初级协调类型,工业用水量位居省内首位;迪庆州和怒江州城市化水平极低,属于轻度失调类型。云南省耦合协调度时空格局的形成机理为:(1)GDP水平决定着云南省州(市)城市化正向演进。(2)城市化水平和水资源系统的变化共同导致了云南省耦合协调度的时空演变。(3)GDP和水资源系统指数的区域差异是云南省耦合协调度产生区域差异的根本原因。

鉴于城市化与水资源系统耦合协调时空格局的形成机制,为了实现云南省城市化与水资源系统向优质协调状态发展,提出如下对策:(1)昆明市应提升水资源总量、降低城镇污水排放量、进一步改进工业生产技术从而实现工业生产节水。(2)曲靖市一方面需提升水资源总量,从而确保工业生产用水需求,另一方面,在工业生产中争取减少工业用水量。(3)怒江州的贡山县、福贡县和泸水县属于强度禁止开发区,兰坪县属于轻度禁止开发区。迪庆州的德钦县和维西县属于强度禁止开发区,香格里拉县属于轻度禁止开发区^[23]。这两个州不宜为了追求城市化与水资源系统的基本协调、中度协调、良好协调、高度协调或者优质协调而进行大规模的工业活动从而提升城市化水平。相反,这两个区域应该完善土地权属管理政策、实行严格的土地用途管制、建立生态补偿机制。此外,云南省的学者应该针对这两个州研究制定发展政策。(4)其余属于初级协调类型的州(市)应该因地制宜且在保护好生态环境的前提下发展经济,从而促进城市化水平的提升。

参考文献:

- [1] 李国强.协调推进城镇化是实现现代化的重大战略选择[J].行政管理改革,2012(11):4-10.
- [2] 马海良,李珊珊.京津冀城镇化与水资源系统的发展与协调性研究[J].当代经济管理,2017,39(9):61-67.
- [3] Patricia Gober. Desert urbanization and the challenges of water sustainability [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010,2(3):144-150.
- [4] Asit K. Biswas. Water management for major urban centers[J]. International Journal of Water Resources Development, 2006, 22(2):183-197.
- [5] 鲍超,方创琳.水资源约束力的内涵、研究意义及战略框架[J].自然资源学报,2006,21(5):844-852.
- [6] 方创琳,乔标.水资源约束下西北干旱区城市经济发展与城市化阈值[J].生态学报,2005,25(9):2413-2422.
- [7] 杨雪梅,石培基,董翰蓉,等.水资源约束下的干旱内陆河流域城市适度规模研究[J].经济地理,2011,31(12):2039-2045.
- [8] 方创琳,步伟娜.水资源约束下河西走廊的城市竞争能力与扩张幅度研究[J].地理科学,2004,24(5):513-521.
- [9] 方创琳,孙心亮.基于水资源约束的西北干旱区城镇体系形成机制及空间组织:以河西走廊为例[J].中国沙漠,2006,26(5):860-868.
- [10] 张胜武,石培基,王祖静.干旱区内陆河流域城镇化与水资源环境系统耦合分析:以石羊河流域为例[J].经济地理,2012,32(8):142-148.
- [11] 张泽毅,刘臣伟,高成,等.快速城市化地区典型村镇水资源承载力及影响因素研究[J].生态与农村环境学报,2021,37(7):877-884.
- [12] 郑德凤,徐文瑾,姜俊超,等.中国水资源承载力与城镇化质量演化趋势及协调发展分析[J].经济地理,2021,41(2):72-81.
- [13] 童彦,潘玉君,张梅芬,等.云南省城市化与水资源的耦合协调发展研究[J].水土保持通报,2020,40(6):243-248.
- [14] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.
- [15] Zhao G L, Liang R F, Li K F, et al. Study on the coupling model of urbanization and water environment with basin as a unit: A study on the Hanjiang Basin in China[J]. Ecological Indicator, 2021,131:108130.
- [16] 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.
- [17] 郭亚军.一种新的动态综合测度方法[J].管理科学学报,2002,5(2):49-54.
- [18] Li Y F, Zhou Y. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment [J]. Environment Management, 2012,98(1):127-133.
- [19] 吴耀,牛俊靖,郝晋伟.区域城镇化综合发展水平评价研究:以陕西省为例[J].西北大学学报:自然科学版,2009,39(6):1043-1049.
- [20] 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.
- [21] 廖重斌.环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J].热带地理,1999,19(2):171-177.
- [22] 王新敏,石培基,焦贝贝,等.敦煌城市发展与水资源利用潜力协调度评价[J].水土保持研究,2015,22(3):203-209.
- [23] 潘玉君,武友德,张谦舵,等.省域主体功能区区划研究[M].北京:科学出版社,2011.