

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

郑德凤¹ 徐文瑾^{1, 2} 姜俊超¹ 吕乐婷¹¹

(1. 辽宁师范大学 地理科学学院, 中国辽宁 大连 116029;

2. 西北大学 城市与环境学院, 中国陕西 西安 710127)

【摘要】: 文章计算 2000—2015 年中国省际城镇化质量指数、水资源承载力指数, 采用标准差椭圆、协调发展指数及空间差异系数、灰色关联系数分析两个系统的时空演化趋势、整体协调发展状态及交互作用机理。结果表明: ①研究期内, 各地区城镇化质量指数均值在 0.11~0.71 之间, 水资源承载力指数在 0.23~0.69 之间, 均处于波动变化状态。②城镇化质量指数的重心位于河南, 偏转方向为“西南”; 水资源承载力指数的重心在陕西, 偏转方向是“东北—东南—西南”。③协调发展度总体属于良性发展趋势; 空间整体分布状态先积聚后扩散。④水资源承载系统主要约束因素排序: 人均供水量>人均水资源量>年末供水综合生产能力>产水模数, 城镇化系统主要胁迫因素排序: 城镇恩格尔系数>图书馆数量>生活垃圾无害化处理率>工业固体废物综合利用率。

【关键词】: 城镇化 水资源承载力 空间差异系数

【中图分类号】: F299.21; TV213 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2021) 02-0072-10

城镇化质量与水资源承载力发展趋势问题是全面性的问题, 包含于社会—经济—资源—环境的可持续发展路径的研究过程中。目前, 以新发展理念为指导的城镇高质量发展成为城市化进程研究中的主要方向, 城镇化过程正由速度倾向型发展为质量倾向型, 城镇化质量涵盖了城市建设质量、基础设施质量、公共服务质量、人居环境质量及市民化质量等^[1]。在城镇化质量提高过程中, 资源环境的匹配性研究显得尤为重要, 尤其以水资源为首的基础资源, 作为物质循环的载体, 理想状态下, 应与该地区城镇的发展形成一种动态平衡状态, 即在不破坏社会与生态系统前提下该地区水资源应具备一定的对三大产业、生态环境、城市规模人口的承载能力, 同时在城镇化质量提高的背景下, 水资源利用效率、水资源供给能力也相应增强^[2]。但是在经济、技术高速发展的推动下, 考虑到供给侧^[3], 部分地区的城镇化质量发展速度与水资源承载能力趋于脱节状态, 从而造成该地区水资源供需不平衡等问题, 进一步限制城镇化质量的提高。为推进资源环境的保护工作, 2016 年第十二届全国人大常委会第二十五次会议通过了《中华人民共和国环境保护税法》, 预想通过经济手段来控制城市水资源的管理。由此可见, 水资源承载力与城镇化质量的关系也是资源环境与人类活动关系的另一种反映, 为解决二者在区域供需上的矛盾, 辅助城镇化质量发展的调节、水资源的合理配置, 有必要对二者的时空演变趋势、区域匹配及协调发展关系进行深入研究。

目前, 水资源承载与城镇化之间亟需解决的问题仍存在于生产生活的方方面面。对于部分发达国家来说城镇化进程已达到

作者简介: 郑德凤(1970-), 女, 黑龙江伊春人, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境与可持续发展。

E-mail: defengzheng@lnnu.edu.cn

吕乐婷(1984-), 女, 辽宁大连人, 博士, 副教授, 研究方向为水资源评估及水生态系统保护。E-mail: lvleting@lnnu.edu.cn

基金项目: 辽宁省社会科学规划基金项目(L20BJL002)

中后期,如美国、意大利、瑞典、澳大利亚,这些国家的关注点在于城市水资源管理^[4]、水预算和水循环规划^[5]、城市地下水补给^[6]、下水道系统与水体水质^[7]等,研究过程中采用编程语言或绘图工具提取地下水资源信息及蒸散发等数据,结合物理和水化学/同位素技术估算地下水补给率,或采用蒙特卡洛等方法,定量分析城市水资源的可持续性。对于发展中国家,追求城镇化速度仍是主要趋势之一,印度采用人类环境系统耦合建模方法探讨快速发展的城市钦奈的城市化与水脆弱性之间的关系^[8]。基于复杂的人口构成、经济体系与不均衡资源分布,中国学者对水资源与城镇化进行深入研究,一方面从城镇化角度来定量分析水资源情况,以快速城市化为研究背景,在城市水域、城市群、集水区、省域等不同尺度分别对开封市^[9]、武汉东湖^[10]、长株潭城市群^[11]、长三角集水区^[12]、江苏^[13]等地区,采用模糊集理论、水生态承载力的多目标模型、基于 PSO 优化的升半 Γ 型分布指数等方法研究湖泊的水环境承载力、城市群的水资源响应、水位变化及城市水资源承载力,寻求水资源可持续发展模式;另一方面,则将水资源作为约束条件,探讨经济及城市的发展模式^[14-16],或将水资源“三条红线”的约束引入城镇化发展的阈值计算^[17],因地制宜地制定符合水资源标准的城市发展模式;此外,将城镇化与水资源作为独立的两个系统进行耦合研究^[18-19]也是研究二者相互关系的一种途径。

综上所述,水资源与城镇化各自的研究较为常见,集中于理论、发展阶段评价及实例研究,所涉及的方法包括常规趋势法^[20]、基于 ESEF 的计算方法^[21]、系统动力学模型^[22]、基于神经网络的水资源承载力模型^[23]等,另外,考虑两种因素的研究只是以水资源或城镇化的角度来探讨另一种要素的发展状态,缺乏二者交互影响机理、协调发展及影响因素等方面的研究,较难从整体的角度看待二者区域匹配性及具体影响因子的作用机理。本文计算城镇化质量指数及水资源承载力指数的同时,运用标准差椭圆分别测度城镇化质量、水资源承载力的时空分布状态,以重心分布及其移动范围等因子,探究二者在研究时段内的空间演变趋势,并计算二者的空间差异系数及协调发展度,从时空匹配趋势及数量协调发展两个角度来评价城镇化质量与水资源的协调发展状态,此外还利用灰色关联分析两个系统的交互影响因素,以寻求不同协调状态的作用机理,为提高城镇水资源利用效率、加速城镇高质量发展、促进城镇水环境转优等提供基础参考,以此缓解水资源—城镇化系统的矛盾,实现二者的可持续发展。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

本文数据来源于《中国统计年鉴》、各省统计年鉴、《中国人口与就业统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》等,由于数据限制,研究范围不包括港、澳、台地区。

1.2 水资源承载力与城镇化质量确定

城镇化质量是市民化、城市建设、公共服务、人居环境、基础设施和城市管理等方面发展质量的综合体^[1,24]。由此,本文将城镇化质量评价体系概括为人口发展、经济发展、城市建设、社会发展、生态建设 5 个子系统(表 1)。人口发展考虑文化程度、人口比例及就业情况,体现了城镇人口的质量与城乡就业结构的变化;经济发展层面从收入与支出的角度出发,以反映国民经济状态;城市建设主要考虑城镇的交通、燃气等公共设施;社会发展层面考虑医院、教育、文化机构等公共服务层面;生态环境建设考虑到城镇管理及人居环境。水资源承载力涵盖了水资源禀赋、经济技术发展、社会经济系统支撑情况、生态环境保障因素,从研究对象来看主要体现在水资源开发利用潜力、区域发展规模(人口规模与经济载量)两个方面^[25],从供需角度,划分了水资源系统、水社会系统、水经济系统、水生态环境 4 个子系统(表 1)。

根据指标的正负向,对数据进行极差标准化处理,有两种标准化方式:

$$\begin{aligned}
x'_{ij} &= \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (\text{正向指标}) \\
x'_{ij} &= \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (\text{负向指标})
\end{aligned} \tag{1}$$

式中： x'_{ij} 表示标准化数据； x_{ij} 表示第*i*项指标第*j*年的数据； $\min x$ 表示*j*年数据的最小值； $\max x$ 表示*j*年数据的最大值。

区域城镇化质量指数、水资源承载力指数计算公式分别为：

$$UQI = \sum_{i=1}^5 x'_{ij} \times w_i \tag{2}$$

$$WCI = \sum_{i=1}^4 x'_{ij} \times w_i \tag{3}$$

式中：UQI 表示城镇化质量指数；WCI 表示水资源承载力指数； w_i 为准则层子系统权重，本文取熵值法和层次分析法计算权重的均值作为指标权重。

1.3 标准差椭圆模型

标准差椭圆（Standard deviational ellipse, SDE）属于空间格局统计分析方法，着重于揭示地理要素空间分布的全局特征^[26-27]。标准差椭圆参数具体计算公式如下：

$$x' = x_i - x_{ave}; y' = y_i - y_{ave} \tag{4}$$

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n W_i^2 x_i'^2 - \sum_{i=1}^n W_i^2 y_i'^2\right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n W_i^2 x_i' y_i' - \sum_{i=1}^n W_i^2 y_i'^2\right)^2 + 4\left(\sum_{i=1}^n W_i^2 x_i' y_i'\right)}}{2 \sum_{i=1}^n W_i^2 x_i'^2} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
\delta_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i x_i' \cos \theta - W_i y_i' \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n W_i^2}} \\
\delta_y &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i x_i' \sin \theta + W_i y_i' \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n W_i^2}}
\end{aligned} \tag{6}$$

式中：(x_{ave}, y_{ave})是(x_i, y_i)的平均中心；W_i为区域城镇化质量指数、水资源承载力指数；x'、y'为各点距离区域中心的相对坐标；根据tan θ可以得到重心分布格局的转角；δ_x和δ_y分别为沿X轴、Y轴的标准差。

1.4 空间差异系数

空间差异系数可以准确体现不同空间数据分布的分异程度^[28]。

$$A = \frac{P \cap I}{P \cup I}; R = 1 - A \tag{7}$$

式中:P、I分别为水资源承载力、城镇化质量的表征椭圆面积；P∩I与P∪I分别表示两个椭圆的交集面积与并集面积；A、R分别为水资源承载力与城镇化的相似性系数和空间差异系数，介于0~1之间，R值越大说明空间差异越大^[28]。

1.5 水资源承载力与城镇化质量协调发展模型

协调发展是系统内部和系统之间实现完美有效的配合从而能在未来发展中不断趋向和谐有序的发展过程^[29]。协调度和发展度分别是系统相互作用程度和发展路径的测量^[30]。

表 1 水资源承载力与城镇化质量指标体系

目标层	准则层	指标层
城镇化质量	人口发展	A11每万人拥有大专以上学历文化程度人数（+）；A12城镇人口比重（+）；A13非农业人口就业比重（+）
	经济发展	A21人均地方生产总值（+）；A22城镇居民人均可支配收入（+）；A23城镇恩格尔系数（-）
	城市建设	A31人均道路面积（+）；A32燃气普及率（+）；A33建成区面积占行政区面积比例（+）
	社会发展	A41千人拥有医生数（+）；A42教育固定资产占比（+）；A43公共图书馆数量（+）
	生态建设	A51人均公园绿地面积（+）；A52工业固体废物综合利用率（+）；A53生活垃圾无害化处理率（+）
水资源承载力	水资源系统	B11年径流深（+）；B12人均水资源占有量（+）；B13供水总量（+）
	水社会系统	B21年末供水综合生产能力（+）；B22人口密度（-）；B23人均生活用水（+）
	水经济系统	B31工业万元产值用水量（-）；B32农田灌溉亩均用水量（-）；B33用水弹性系数（-）
	水生态环境系统	B41人均生态用水（+）；B42人均生活COD排放量（-）；B43化肥施用强度（-）

注：表中的“+”表示对应的指标为正向指标，“-”表示对应的指标为负向指标。

$$D = \sqrt{C \times T}; C = \left\{ \frac{UQI \times WCI}{\left[\frac{UQI + WCI}{2} \right]^2} \right\}^k \tag{8}$$

$$T = \alpha \times UQI + \beta \times WCI \tag{9}$$

式中：D 表示城镇化质量指数与水资源承载力指数协调发展度；C 表示协调度；T 表示发展度； α 和 β 为待定权重，本文选取 0.5（表示两者同等重要）； $k \geq 2$ ，本文取 $k=2$ 。

为具体评价全国城镇化质量与水资源承载力的协调发展度，结合实际情况及已有文献^[31]制定了发展协调度的分级标准（表 2）。

1.6 灰色关联度

本文采用刘耀彬等^[33]建立的灰色关联模型来反映城镇化质量与水资源承载力的相互影响因素。

$$\xi_j(t) = \frac{\min_i \min_j |Z_i^x(t) - Z_j^y(t)| + \rho \max_i \max_j |Z_i^x(t) - Z_j^y(t)|}{|Z_i^x(t) - Z_j^y(t)| + \rho \max_i \max_j |Z_i^x(t) - Z_j^y(t)|} \quad (10)$$

式中： $\xi_j(t)$ 表示 t 时刻的关联系数； $Z_i^x(t)$ 、 $Z_j^y(t)$ 表示 t 时刻地区城镇化质量、水资源承载力数据标准化值； ρ 表示分辨指数，一般取 0.5，范围在 0~1 之间。

取截面数据关联系数的平均值，得到全国城镇化质量与水资源承载力系统内部指标的相互关联系数 β_{ij} 。参考现有研究^[34-35]，将系统影响因素关联度取 $0 < \beta_{ij} \leq 0.35$ 为低； $0.35 < \beta_{ij} \leq 0.65$ 为中等； $0.65 < \beta_{ij} \leq 0.85$ 为高； $0.85 < \beta_{ij} \leq 1$ 为极高。

2 结果分析

2.1 水资源承载力与城镇化质量指数时间演化分析

利用公式（2）、（3）计算得到中国 2000—2015 年城镇化质量指数与水资源承载力指数，其中 2000、2005、2010、2015 年的结果如图 1、图 2 所示。

由图 1 可知，2000—2015 年各地区城镇化质量指数均值由 0.26 上升至 0.34，增加了 0.08，增幅 30%。2000 年，0.4 以上的区域有北京、天津、上海、广东，最小的是贵州（0.11），至 2005 年增加了浙江和江苏，此阶段除了辽宁、吉林、湖北、广西、海南、云南、西藏，其他地区均以不同幅度上升，增幅最大的是重庆（增加 51%）。2010 年城镇化质量指数在 0.4 以上的地区比 2005 年增加了山东，而宁夏增长幅度最大（增加 37.9%）。2015 年 0.4 以上的地区没有增加，整体增幅较小。总体而言，2000—2005 年，长三角、珠三角、京津冀的外贸资金是城镇化质量提高的主要推动力，带动了城镇人口增加及建设用地的扩张，城市管理及公共服务也相应增强。2005—2010 年，长三角、珠三角、京津冀的进出口额度出现下滑趋势，导致 GDP 增长率出现低谷，而山东以青岛和济南为中心的东西发展格局推动了城镇化质量的提高，宁夏在西部大开发及退耕还林的政策驱动下，城镇化质量显著提升。2010—2015 年，东部地区趋于缓慢上升的状态，西部地区反而在经济、政策等带动下，质量提升较快。

图 2 显示 2000—2015 年水资源承载力指数均值先下降后上升，峰值和谷值分别出现在 2002 年（0.33）和 2011 年（0.29），年际变化幅度较小，最大增幅约占城镇化质量指数的一半。2000—2005 年全国水资源承载力指数处于上升趋势，增幅最大的是内蒙古，比 2000 年增加了 87%；2005—2010 年处于上升趋势的地区有 13 个，变化幅度最大的是山西（13%）。2010—2015 年处于上升趋势的地区增加至 17 个，增幅最大的是广西。2000—2005 年，水资源承载力的提升与降水量有关，此外对水资源管理的重视亦起到一定作用。2005—2010 年，东部地区变化幅度较小，水资源充足，抗压能力较强，西部地区受自然因素影响较大。2010—2015 年，各地水污染治理、水环境建设等项目的实施进一步增强了各地水资源承载力，部分地区人口、经济的发展也拉

动了用水需求（京津冀、安徽、山东等）。

2.2 水资源承载力与城镇化质量指数空间趋势分析

为准确揭示中国城镇化质量与水资源承载力的空间演化趋势，结合 GIS 运用标准差椭圆，绘制 2000、2005、2010、2015 年中国城镇化质量、水资源承载力的椭圆分布及重心移动，以探讨两个系统的空间平衡性（图 3、图 4）。

表 2 协调发展度分级标准

阈值	协调度等级	发展度等级	协调发展度等级	内涵
0.000~0.300	严重失调类	严重衰退类	严重失调衰退类	系统协调发展存在严重差异
0.301~0.400	中度失调类	中度衰退类	中度失调衰退类	系统协调发展存在一定差异
0.401~0.500	轻微失调类	轻微衰退类	轻微失调衰退类	系统协调发展出现轻微差异
0.501~0.550	中等协调类	中等发展类	中等协调发展类	系统协调发展基本无差异
0.551~0.700	良好协调类	发展良好类	良好协调发展类	系统协调发展状态良好
0.701~1.000	优质协调类	发展优质类	优质协调发展类	系统协调发展状态极佳

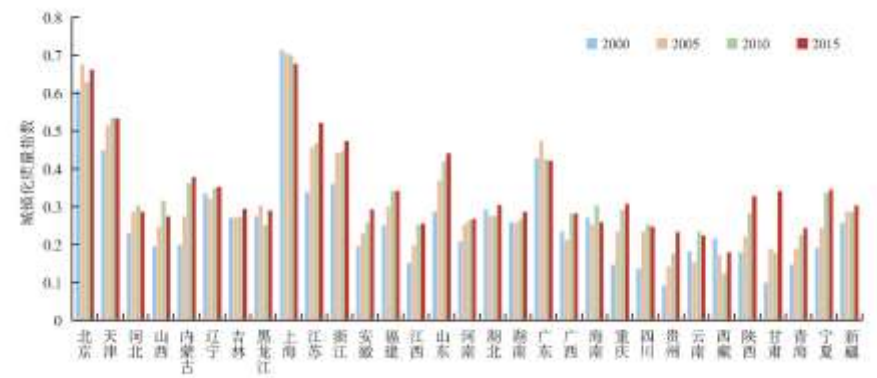


图 1 中国城镇化质量指数的时间演化

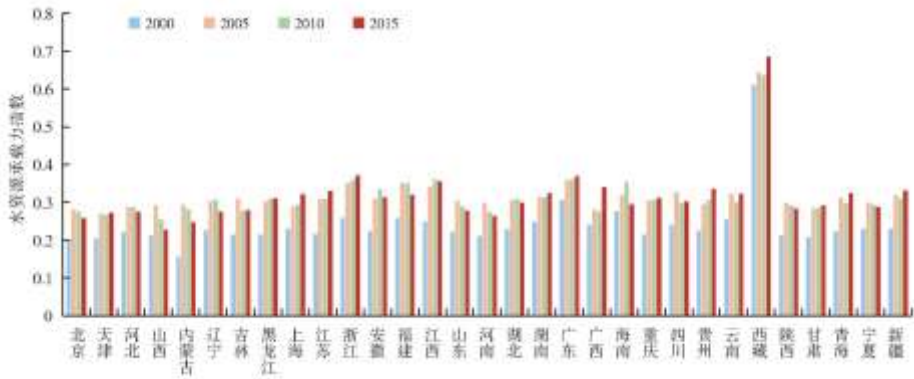


图 2 中国水资源承载力指数的时间演化

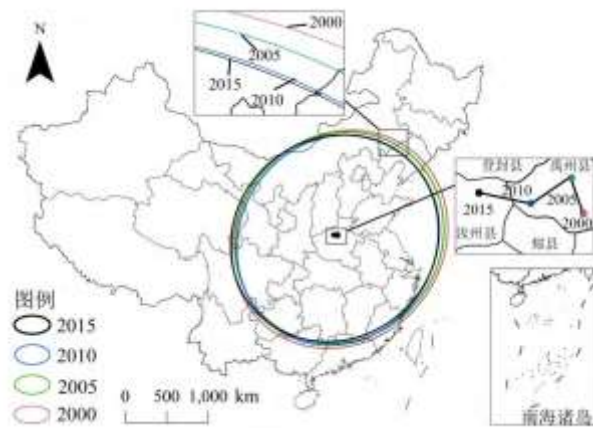


图 3 中国城镇化质量空间分布格局

2.2.1 城镇化质量空间趋势分析

2000—2015 年城镇化质量重心位于河南西北部，在中国几何重心（ $103^{\circ} 50' E, 36^{\circ} N$ ）^[33] 的东南部。椭圆方位角呈波动变化趋势，且形状指数均在 0.89~0.92 之间，数据离散程度较大，总体呈“上升”的趋势。2000—2005 年的椭圆长轴由 1175.54km 下降至 1123.71km，有东西向发展趋势，至 2010 年下降到最低点（1105.85km），2010—2015 年期间呈先上升后下降的趋势。研究期内长/短轴的整体变化是先减小后增大，但是与 2000 年相比，2015 年的长/短轴均有减小，说明城镇化质量的分布集聚性增强。

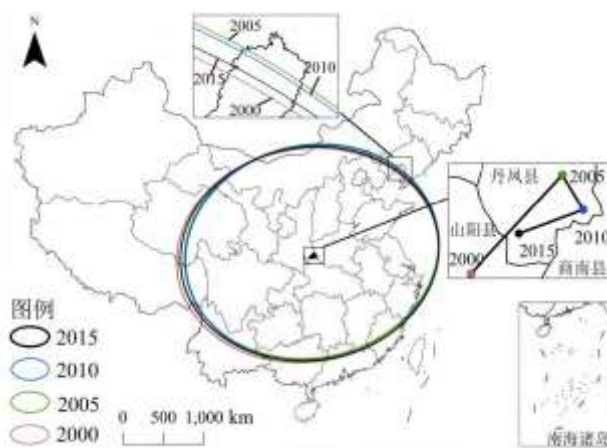


图 4 中国水资源承载力空间分布格局

由图 3 和表 4 可以看出研究期内 2015 年重心位置在 2000 年的西北方向，且移动距离呈逐渐增加的趋势。各时期重心分别在 $34^{\circ} 3' 15'' N \sim 34^{\circ} 15' 56'' N, 112^{\circ} 52' 27'' E \sim 113^{\circ} 25' 51'' E$ 之间移动，其中 2000—2005 年，重心移动距离最小（19.05km），南北向移动距离是东西向的 3.8 倍；2005—2010 年，重心移动距离增大至 32km，南北向与东西向的移动距离差值只有 2.69km；2010—2015 年，移动距离最大为 32.83km，移动速率也是最大，达到 6.57km/a，东西向移动距离是南北向的 1.49 倍。移动速率整体呈逐渐增大的趋势，体现了城镇化质量发展的变异程度。2000—2010 年城镇化质量发展趋向于西部地区，西

部大开发的实施，自然资源、区域经济互补的优势，辅助了西部地区的发展，而向南移动的趋势则是受长三角和珠三角的影响。2010—2015 年由于政策、经济的影响，先进技术的流入促进了社会进步，重心向西部移动，同时由于前期振兴东北老工业基地的效果，城镇化质量的重心向北方移动，事实上，北方地区主要是工业产业链，对于基础工业产品来说，社会经济需求降低，经济增速变缓，城镇化速率也逐渐放缓。

2.2.2 水资源承载力空间趋势分析

2000—2015 年水资源承载力椭圆重心位于陕西，且在 33° 20′ N~33° 40′ N, 110° 4′ E~110° 35′ E 间移动，方位角在 74.97° ~78.34° 之间变动。2000—2015 年椭圆形状指数呈波动变化趋势，由 2000 年的 0.828 上升至 2010 年的 0.84，说明水资源空间分布越来越接近正圆，空间分布趋于均衡状态，水资源承载力的区域差异逐渐减小，而在 2010—2015 年期间呈下降的趋势。2000—2015 年长轴呈先减小后增大的趋势，短轴的变化趋势为“减小—增大—减小”，2015 年相比 2000 年减小了 16.5km，而短轴减小 2.03km，说明东西向的水资源承载力均衡发展程度小于南北向。

由图 4 及表 4 可看出，水资源承载力重心在 2000—2015 年期间的偏转方向是“东北—东南—西南”。重心移动距离先减小后增大，2000—2005 年移动距离最大（55.41km）。东西移动距离的变化趋势和总距离变化趋势相同，但是南北方向移动距离呈“减小”的趋势，2005—2010 年期间两个方向的变化最大，移动速率也最大。重心在中国几何中心（兰州）以东表示东部地区水资源承载力高于西部地区；南北方向整体变化大于东西方向，说明南北方向水资源承载力变化比东西方向变化明显，水资源承载力大小受水资源储量及社会经济发展的影响，西部地区受降水量的影响，水资源短缺，节水灌溉、再生水利用等技术不先进，导致水资源承载力较小，南北方向水资源承载力变化受南水北调等水利工程的影响较大，均衡了水资源的南北差异。

表 3 中国水资源承载力与城镇化质量的标准差椭圆参数

指数	年份	重心坐标		周长(km)	长轴(km)	短轴(km)	方位角(°)	形状指数
		经度(°)	纬度(°)					
城镇化质量	2000	113° 25′ 51″E	34° 5′ 54″N	7010.32	1175.54	1054.30	46.94	0.89
	2005	113° 23′ 12″E	34° 15′ 56″N	6796.90	1123.71	1039.03	47.84	0.92
	2010	113° 9′ 4″E	34° 3′ 15″N	6661.60	1105.85	1013.65	37.64	0.92
	2015	112° 52′ 27″E	34° 14′ 23″N	6719.50	1112.64	1025.40	54.31	0.92
水资源承载力	2000	110° 4′ 46″E	33° 20′ 13″N	7550.83	1325.20	1071.63	78.06	0.81
	2005	110° 31′ 26″E	33° 40′ 9″N	7428.10	1290.30	1068.00	74.97	0.83
	2010	110° 35′ 56″E	33° 32′ 30″N	7440.50	1286.20	1077.60	75.24	0.84
	2015	110° 18′ 46″E	33° 28′ 16″N	7490.90	1308.70	1069.60	78.34	0.82

表 4 中国水资源承载力与城镇化质量标准差椭圆移动参数

指数	年份	方向	距离(km)	速率(km/a)	东西向移动距离	南北向移动距离
城镇化质量	2000—2005	西北	19.05	3.81	4.92	18.62
	2005—2010	西南	32.00	6.40	26.22	23.53
	2010—2015	西北	32.83	6.57	30.83	20.66
水资源承载力	2000—2005	东北	55.41	11.08	49.48	36.98
	2005—2010	东南	15.81	3.16	8.35	14.19
	2010—2015	西南	27.69	5.54	31.85	7.85

2.3 水资源承载力与城镇化质量协调发展度分析

根据 2000—2015 年中国城镇化质量与水资源承载力的协调发展度计算结果，结合表 2 的分级标准以分析水资源承载力与城镇化质量的协调发展性（图 5）。

2000—2015 年各地区协调发展指数在 0.3~0.7 之间，包括中度失调衰退类、轻微失调衰退类、中等协调发展类、良好协调发展类，总体属于良性发展趋势。由图 5 可知，2000 年中国的城镇化质量与水资源承载力协调发展程度较好地区主要分布于东部沿海浙江、广东、上海与西部新疆、西藏等地，新疆虽然发展度不高但协调状态良好，西藏由于水资源含量极高，承载力发展水平高，但自然条件恶劣限制了城镇化的发展，而浙江与广东等东部地区发展度及协调度都较高。2005 年，除西部新疆地区，承载力与城镇化水平协调度较高，全国的协调发展度呈现自东向西递减的趋势，整体水平较 2000 年有所提升，西藏受降水量增加及环境保护的影响，承载力有一定程度的提高，但是城镇化质量不变，降低了该地区的协调程度，其他地区的协调发展度都有增加。2010 年，只有贵州、甘肃、西藏 3 个地区的协调发展处于中度失调衰退类，贵州城镇化质量指数为 0.18，导致发展度较低，同时其水资源较为丰富，影响该区的协调发展度的整体水平，而甘肃的城镇化质量指数与贵州一致，但降水量小于贵州，所以该地区发展协调度较低；另一方面，内蒙古上升至中等协调发展类型，城镇化质量指数由 2005 年 0.25 上升至 2010 年的 0.36，受内蒙古的经济发展的影响，其中 GDP 由 2005 年的 3905.03 亿元增至 2010 年的 11672 亿元。2015 年，全国的协调发展状况均有提升，协调发展度均值由 2000 年的 0.46 上升至 2015 年的 0.55，中等协调发展类的地区达到 15 个，只有西藏还处于中度失调衰退类。从协调发展度可以看出各地区的水资源承载力与城镇化的协调度比发展度好，总体协调发展度水平低，城镇化进程中经济增长、人口增多、社会发展使得生活用水、生产用水、生态用水等增加，从而给水资源系统造成巨大压力，但是正面效应大于负面效应，两个系统的协调发展度逐渐提高。

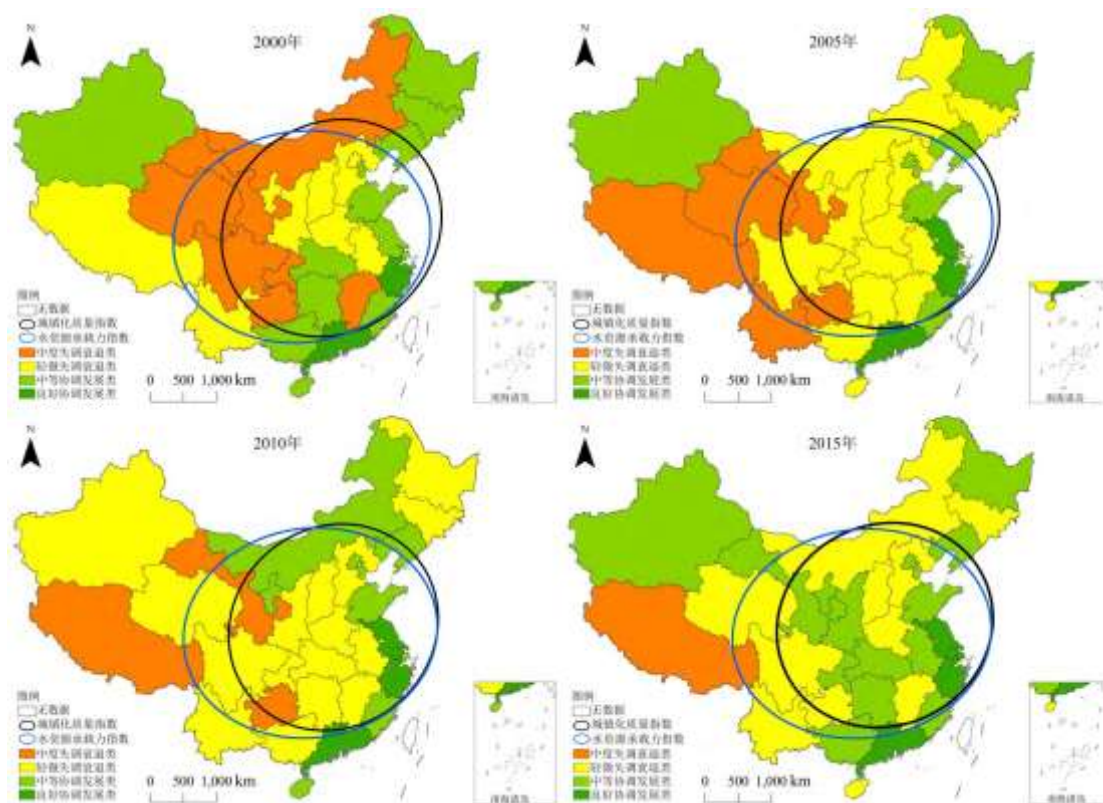


图 5 中国水资源承载力与城镇化质量协调发展度及空间椭圆

2.4 水资源承载力与城镇化质量空间差异系数

为进一步探索城镇化质量与水资源承载力的空间匹配度，根据 2000—2015 年中国城镇化质量指数与水资源承载力指数及其椭圆数据，绘制了二者的空间椭圆及空间差异系数统计图（图 5、图 6）。

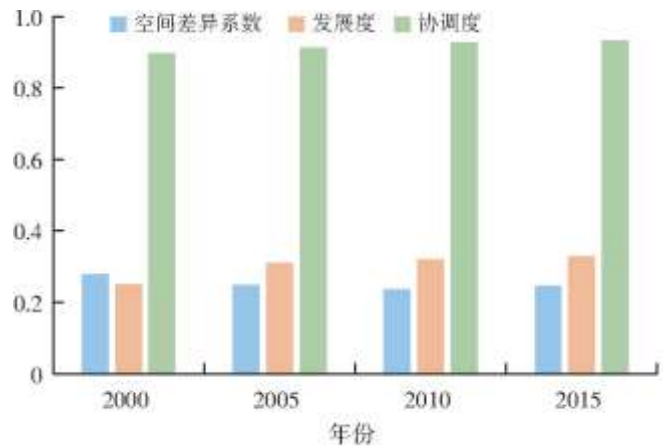


图 6 水资源承载力与城镇化质量空间差异系数

城镇化质量椭圆与水资源承载力椭圆没有完全重合说明二者存在一定空间差异，如果两个椭圆完全重合则属于空间匹配。2000—2015 年二者的空间差异系数处于“减小—增加”趋势，总体波动较小。2000 年空间差异系数最大（0.28），城镇化质量与水资源承载力在空间上存在较大的分异，至 2010 年有缓慢下降趋势，说明二者的发展在空间分布上趋于一致，2015 年上升至 0.247，空间分异性增加，匹配度降低。结合图 5、图 6, 2000—2010 年水资源承载力与城镇化的协调发展度呈逐渐增加的趋势，协调度、发展度和空间差异系数的变化趋势相反，二者的空间分布处于积聚状态且具有同位性，全国只是部分地区的发展度朝向良性发展；2010—2015 年，水资源承载力与城镇化的协调发展度呈逐渐增加的趋势，与空间差异系数的趋势相同，说明二者处于扩散的空间状态，状态良好的地区也在增加。

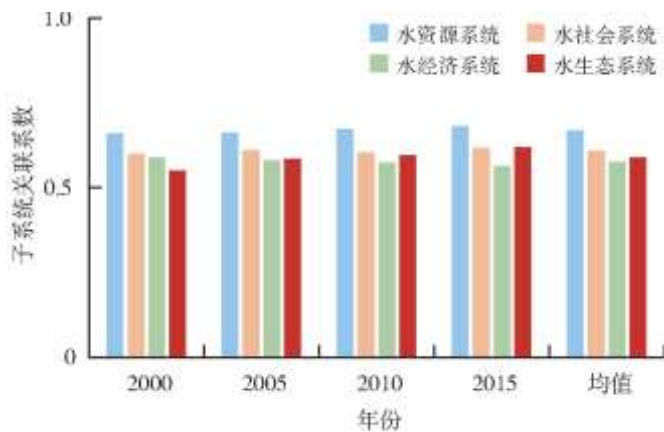


图 7 水资源承载力对城镇化质量的约束作用

2.5 水资源承载力与城镇化质量交互影响因素分析

根据式（10）计算城镇化系统与水资源承载系统各指标的关联系数，以探究城镇化质量与水资源承载力之间的胁迫及约束作用。2000、2005、2010、2015 年各阶段各子系统的关联系数变化趋势及各因子关联系数（图 7~图 9），研究期内两个系统的关联系数在 0.43~0.86 之间，处于中等偏上状态。

2.5.1 水资源承载力对城镇化质量的约束分析

水资源承载力对城镇化质量的约束综合指数为 6.10，从功能团关联系数来看：水资源系统（0.669）>水社会系统（0.608）>水经济系统（0.588）>水生态环境（0.577），水资源承载力的自身资源条件对城镇化质量的约束力最强，其次是水社会系统，反映了社会需求对城镇化质量的制约；从时序上看，水资源系统的关联系数以小幅度降低，而水生态环境系统的关联系数相对其他系统增加幅度大；由图 9 可知，从影响因子（排名前四）看：人均供水量（0.694）>人均水资源量（0.681）>年末供水综合生产能力（0.673）>产水模数（0.647），人均供水总量对城镇化的约束力最强。由此看出水资源量是城镇化质量强大的约束力，人文发展始终依赖于自然资源禀赋，从侧面印证了中国水资源与社会经济东南高西北低的时空分布格局，随着经济、科技及国家战略的提升，城镇化进程中通过各种水利工程等人为干预方式降低对水资源时空分布差异产生区域条件的依赖性，同时生态环境保护的意识逐渐提升，未来生态环境系统将会与城镇化质量关系越来越密切。

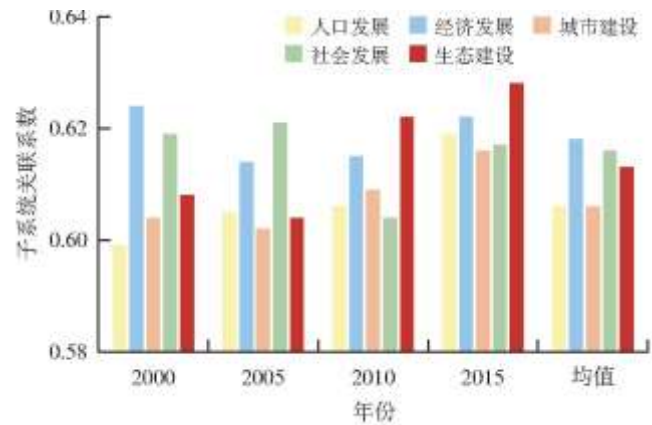


图 8 城镇化质量对水资源承载力的胁迫作用

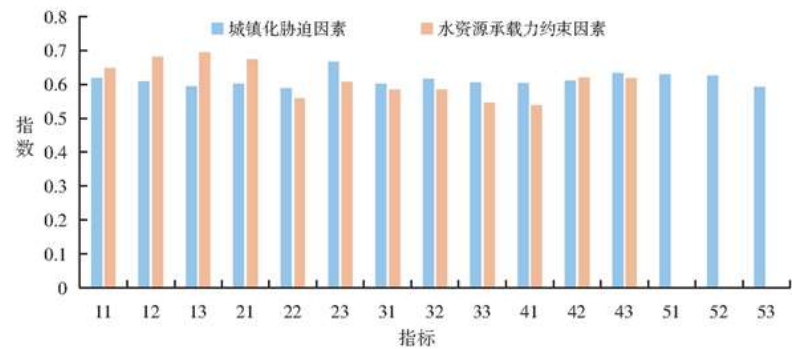


图 9 水资源承载力与城镇化质量交互影响因子关联系数均值

2.5.2 城镇化质量对水资源承载力的胁迫分析

城镇化质量对水资源承载力的综合胁迫指数为 6.12, 从功能团关联系数来看: 生态环境 (0.618) > 城市建设 (0.616) > 人口发展 (0.613) > 社会发展 (0.606) = 经济发展 (0.606), 城镇化过程中生态环境对水资源承载力的胁迫作用最大, 其次是城市建设, 而社会发展与经济发展胁迫性最小; 时序方面, 人口系统与水资源承载力的关联度逐年上升, 人口逐年增长导致了胁迫程度增加, 生态建设对水资源承载力的胁迫程度增加最明显, 城市建设的胁迫程度也较大, 经济建设的胁迫程度逐渐减小; 由图 9 可知, 从影响因子看: 城镇恩格尔系数 (0.667) > 图书馆数量 (0.632) > 生活垃圾无害化处理率 (0.629) > 工业固体废物综合利用率 (0.625), 城镇恩格尔系数与水资源承载力的关联度最大, 对其胁迫程度也是最大。随着生态文明建设的提出及居住环境变化, 社会对生态环境要求越来越高, 导致资源成本的增加, 生态建设、社会发展对水资源承载力的胁迫不容忽视, 同时经济发展为投资与科技进步奠定了基础, 从侧面提高水资源利用效率, 所以经济发展对水资源承载力的胁迫作用是降低的。

3 结论与讨论

本文利用标准差椭圆分析了城镇化质量、水资源承载力的时空格局, 并且计算了二者的协调发展度、空间差异系数, 同时利用灰色关联模型分析了两个系统的交互影响因素。结论如下:

(1) 2000—2015 年各地城镇化质量指数均值处于波动变化的趋势 (0.11~0.71); 水资源承载力指数均值先下降后上升 (0.23~0.69), 水资源承载力指数的年际变化幅度比城镇化质量指数小。

(2) 城镇化质量重心分布于河南中部 (34° 3' 15" N~34° 15' 56" N, 112° 52' 27" E~113° 25' 51" E), 形状指数均在 0.89~0.92 之间, 偏转方向是“西南”, 长/短轴变化趋势为“减小—增大”, 移动距离与速率整体呈现逐渐增大的趋势。水资源承载力指数重心分布于陕西, 重心在 33° 20' N~33° 40' N, 110° 4' E~110° 35' E 范围内移动, 偏转方向是“东北—东南—西南”。长、短轴变化趋势为“减小—增大—减小”, 移动距离的趋势是“减小—增大”。

(3) 2001—2015 年水资源承载力与城镇化质量的协调发展度 (0.35~0.70) 等级分为中度失调衰退类、轻微失调衰退类、中等协调发展类、良好协调发展类。空间差异性系数先减小后增大, 水资源承载力与城镇化质量空间协调分布处于先积聚后扩散状态。

(4) 水资源承载力对城镇化质量的约束指数为 6.10, 主要约束系统是水资源系统, 对应的影响因素为人均供水量, 其次是水社会系统, 对应影响因素是人口密度; 城镇化质量对水资源承载力的综合胁迫指数为 6.12, 主要约束系统是生态环境, 影响因素排序为城镇恩格尔系数>图书馆数量>生活垃圾无害化处理率>工业固体废物综合利用率。

参考文献:

- [1] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向[J]. 地理研究, 2019, 38(1): 13-22.
- [2] Li W F, Hai X, Han L J, et al. Does urbanization intensify regional water scarcity? Evidence and implications from a megaregion of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 244. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118592.
- [3] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [4] Kalhor K, Emaminejad N. Sustainable development in cities: Studying the relationship between groundwater level and urbanization using remote sensing data[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 9. DOI:10.1016/j.gsd.2019.100243.

-
- [5]Hall B,Currell M,Webb J.Using multiple lines of evidence to map groundwater recharge in a rapidly urbanising catchment:Implications for future land and water management[J]. Journal of Hydrology, 2019, 580. DOI:10. 1016/j. jhydrol. 2019. 124265.
- [6]Minnig M,Moeck C,Radny D,et al.Impact of urbanization on groundwater recharge rates in Dübendorf, Switzerland[J]. Jour - nal of Hydrology, 2017, 563:1135–1146.
- [7]Salerno F,Gaetano V,Gianni T.Urbanization and climate change impacts on surface water quality:Enhancing the resilience by reducing impervious surfaces[J]. Water Research, 2017, 144:491–502.
- [8]Srinivasan V,Seto K C,Emerson R,et al.The impact of urbanization on water vulnerability:A coupled humanenvironment system approach for Chennai, India[J]. Global Environmental Change, 2012, 23(1) :229–239.
- [9]赵军凯, 李九发, 戴志军, 等. 基于熵模型的城市水资源承载力研究——以开封市为例[J]. 自然资源学报, 2009, 4(11) : 86–93.
- [10]Ding L,Chen K L,Cheng S G,et al.Water ecological carrying capacity of urban lakes in the context of rapid urbanization:Acase study of East Lake in Wuhan[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2015, 89:104–113.
- [11]熊鹰, 苏孟婷, 张方明, 等. 长株潭城市群城镇化进程与水资源利用响应关系研究[J]. 人文地理, 2018, 33(6) :75–82.
- [12]Song S,Xu Y P,Zhang J X,et al.The longterm water level dynamics during urbanization in plain catchment in Yangtze River Delta[J]. Agricultural Water Management, 2016, 174:93–102.
- [13]马海良, 施陈玲, 王蕾. 城镇化进程中的江苏水资源承载力研究——基于组合赋权和升半 Γ 型分布函数[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(11) :1697–1703.
- [14]白千千, 王录仓, 杨小梅. 水资源承载力下的城市化发展模式——以黑河流域张掖市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(4) :77–80.
- [15]鲍超, 方创琳. 干旱区水资源对城市化约束强度的时空变化分析[J]. 地理学报, 2008, 63(11) :22–32.
- [16]曹祺文, 鲍超, 顾朝林, 等. 基于水资源约束的中国城镇化 SD 模型与模拟[J]. 地理研究, 2019, 38(1) :167–180.
- [17]冯浩源, 石培基, 周文霞, 等. 水资源管理“三条红线”约束下的城镇化水平阈值分析——以张掖市为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(2) :287–301.
- [18]鲍超. 中国城镇化与经济增长及用水变化的时空耦合关系[J]. 地理学报, 2014, 69(12) :1799–1809.
- [19]郭莎莎, 陈明星, 刘慧. 城镇化与资源环境的耦合过程与解耦分析——以北京为例[J]. 地理研究, 2018, 37(8) :1599–1608.
- [20]朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2) :180–188.

-
- [21]曲耀光,樊胜岳.黑河流域水资源承载力分析计算与对策[J].中国沙漠,2000,20(1):2-9.
- [22]焦雯珺,闵庆文,李文华,等.基于ESEF的水生态承载力:理论、模型与应用[J].应用生态学报,2015,26(4):1041-1048.
- [23]刘树锋,陈俊合.基于神经网络理论的水资源承载力研究[J].资源科学,2007,29(1):99-105.
- [24]薛俊菲,陈雯,张蕾.中国市域综合城市化水平测度与空间格局研究[J].经济地理,2010,30(12):71-77.
- [25]王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4):507-514.
- [26]贺三维,王伟武,曾晨,等.中国区域发展时空格局变化分析及其预测[J].地理科学,2016,36(11):1622-1628.
- [27]赵璐.中国经济格局时空演化趋势[J].城市发展研究,2013,20(7):14-18.
- [28]赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.
- [29]赵丹阳,佟连军,仇方道,等.松花江流域城市用地扩张的生态环境效应[J].地理研究,2017,36(1):74-84.
- [30]黄木易,程志光.区域城市化与社会经济耦合协调发展度的时空特征分析——以安徽省为例[J].经济地理,2012,32(2):77-81.
- [31]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.
- [32]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.
- [33]赵媛,杨足膺,郝丽莎,等.中国石油资源流动源-汇系统空间格局特征[J].地理学报,2012,67(4):455-466.
- [34]关兴良,魏后凯,鲁莎莎,等.中国城镇化进程中的空间集聚、机理及其科学问题[J].地理研究,2016,35(2):227-241.