城市发展与河网演变间的相互作用
——以郑州市主城区为例

罗英菡，刘 畅，田国行
（河南农业大学 风景园林与艺术学院，河南 郑州 450002）

摘 要：[目的] 对河南省郑州市主城区城市发展与河网演变间的相互作用进行分析，为合理调节城市水资源提供科学依据。[方法] 以郑州市主城区为研究对象，基于 1994，2002，2009 和 2019 年遥感影像数据，计算河网特征指数并建立耦合协调模型，定量分析河网演变及其与城市发展间的相互作用关系。[结果] 城市发展与河网演变间的相互影响表现在城市发展对河网的破坏与促进作用和河网对城市发展的支撑与约束作用。城市发展导致河网密度降低，走向单一，结构简化，但河网是城市形态的骨架并提供物质基础，当河网承受能力趋于阈值时会反向约束城市发展，进而引起对河网的修复。郑州市主城区城市发展与河网耦合协调度变化可分为波动、磨合和稳发展 3 个阶段：初期城市的高强度发展使两者协调度迅速下降；中期开始注重河网的修护，人工水系的建设巩固了河网结构，期间受地形影响，城区主体避开西南丘陵地区向东部平原地区扩展；后期水系的治理与修复成效显著，协调度提升到初级协调等级并有逐步提升趋势。[结论] 人工水利措施的干预可缓解城市发展对河网的影响，但河网的修复成效落后于城市发展进程，仍需加强对河网的修复与保护。

关键词：耦合协调度模型；河网特征体系；城市发展；郑州市
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2021)02-0258-09 **中图分类号**：P333，P292

文献参数：罗英菡，刘畅，田国行.城市发展与河网演变间的相互作用[J].水土保持通报，2021，41(2)：258-266.DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.034；Luo Yinghan，Liu Chang，Tian Guohang. Interaction between urban development and river network evolution [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2021，41(2)：258-266.

Interaction Between Urban Development and River Network Evolution
—A Case Study in Main Urban Area of Zhengzhou City

Luo Yinghan，Liu Chang，Tian Guohang
(*School of Landscape Architecture and Art，Henan Agricultural University，Zhengzhou，He'nan* 450002，*China*)

Abstract：[Objective] The interaction between urban development and river network evolution in the main urban area of Zhengzhou City，He'nan Province was analyzed in order to provide scientific basis for rational regulation of urban water resources. [Methods] Taking the main urban area of Zhengzhou City as the research area，based on remote sensing image data in 1994，2002，2009 and 2019，the characteristic index of river network was calculated and the coupling coordination model was established to quantitatively analyze the evolution of river network and the interaction between river network and urban development. [Results] The interaction between urban development and river network evolution was manifested in the destruction and promotion of urban development on river network and the supporting and restricting functions of river network on urban development. Urban development led to the decrease of river network density，the single linear trend and simplified structure，but river network was the skeleton of urban form and material basis. When the bearing capacity of river network tended to the threshold，the urban development would be restrained in reverse，which caused the attention to the river network restoration. The change of coordination degree between urban development and river network could be divided into three stages：fluctuation，running-in and stable development：

收稿日期：2020-11-17 **修回日期**：2021-01-06
资助项目：河南省城乡绿地资源调控与景观生态设计学科创新引智基地项目(GXJD006)
第一作者：罗英菡(1997—)，女(汉族)，河南省南阳市人，硕士研究生，研究方向为城乡绿地资源调控。Email：499476867@qq.com。
通讯作者：田国行(1964—)，男(汉族)，河南省封丘县人，博士，教授，博士生导师，主要从事城乡绿地资源调控研究。Email：tgh0810@163.com。

in the early stage, the high intensity development of the city made the coordination degree of the two decline rapidly. In the middle period, people began to pay attention to the repair and maintenance of river network, and the construction of artificial water system consolidated the structure of river network. Affected by the topography, the main urban areas avoided the southwest hilly areas to the east plain area expansion. In the later stage, the control and restoration of the water system achieved remarkable results, and the coordination degree was upgraded to the primary coordination level with the trend of gradual improvement. [Conclusion] The intervention of artificial water conservancy measures can alleviate the impact of urban development on river network, but the restoration effect of river network lags behind the process of urban development, therefor, it is still necessary to strengthen the restoration and protection of river network.

Keywords: coupling coordination degree model; river network characteristic system; urban development; Zhengzhou City

城市河流肩负着行洪排涝、蓄水调节的功能,是城市水资源的重要载体。快速城市化发展以来,河网水系受到人类活动影响最为强烈[1-2],不透水面的急速扩张改变了城市河网格局[3],带来洪涝频发、水质恶化等一系列水安全、水生态问题,制约了城市可持续发展[4],引起了广大学者的关注,对城市水系的研究也从治污、保质转移到恢复生态河网水系[5],因此,研究了解城市发展与河网水系间的相互作用具有重要意义。从 1945 年提出的 Horton 定律和 Strahler 河流分级方法到结合 GIS 空间技术,对城市化下河网水系结构与功能的变化进行了许多研究,结果表明,全球 60%的河流随着城市化进程而改变[6],不少高度城市化地区失去了至少 85%的河道,芝加哥和洛杉矶等大都市出现了"城市河流沙漠"现象[7-8]。国内则多以东南沿海平原地区高城市化的上海、深圳以及长三角、珠三角等城市群流域为研究对象,袁雯等人分析得出上海河流结构呈现自然型—井型—干流型演变趋势[9],蒋祺等人发现长沙市各个时期城市发展速度与水系衰减速度呈正相关关系[10],杨柳等[11-12]发现苏州市近 50 a 城市化对水系衰减的贡献率达 67%以上,在长三角平原区,城市化影响了河网的形态结构和空间格局,主干河流被渠化、次支河流淤积被填埋,导致水系衰退。但城市发展与河网水系之间的影响不是单向的,城市发展给河网带来破坏与促进作用,同时河网也会给城市发展以支撑与约束作用,两者在发展中通过正向与反向的动态反馈以达到耦合共生[13-14]。当前文献较多阐述了平原河网区高度城市发展对河网形态结构的影响,研究区域与方向多相似,而对于系统分析城市发展过程中与河网水系间耦合协调性测定分析的文献较少,尤其是高速发展的中原地区,水资源总量较少使得对河网的保护更为重要。

郑州市地跨黄河、淮河两大水系,正处于国家中心城市的拟建设阶段,是中原地区交通、贸易的重要枢纽,超大的城市尺度和迅速的城市化发展强烈地改变了地表河流,并严重影响了雨水资源的时空分布。基于以上分析,本文选取河南省郑州市主城区为研究区,在分析河网特征变化同时建立城市发展与河网演变的耦合模型,通过计算综合发展指数、耦合度和耦合协调度来分析城市发展与河网间耦合协调度变化,为内在结构的调整与合理保护和城市从开拓和建设转向以统筹协调资源保护的发展提供依据。

1　研究区概况

郑州市主城区位于郑州市中部偏北区域,地处黄河冲积形成的平原地区,地势平坦,地跨北纬 34°36′6.80″—34°58′17.09″,东经 113°26′48.90″—113°51′53.33″,主要包括二七区、金水区、中原区、惠济区、管城区,总面积 1 033.47 km^2。主要河流有贾鲁河、金水河、熊耳河及东风渠等,均为季节性河流,属淮河水系,其中除贾鲁河和七里河下游、潮河有少量基流外,均无自然基流且多为排污河道,年降水量由南向北逐渐递减。郑州市作为中部地区经济发展、交通运输等的枢纽,城市化发展程度高、速度快、尺度大,致使河流两侧多被占用为建设用地,河道变窄并趋于硬化,摆动范围缩小,河流水域面积缩小,改变了城市水循环过程。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源与处理

2.1.1　空间数据　本文空间数据来源于地理空间数据云,结合 1994 年前后的"民工大潮"扩大了城市建设队伍;2003 年将河流生态建设纳入规划建设理念的郑东新区开工;到 2012 年东区龙湖开始蓄水和 2014 年南水北调的完工,丰富了郑州的河湖水系;再到 2018 年郑州拟建国家中心城市,因而选择 1994,2002,2009 和 2019 年作为研究年份,下载 Landsat 系列遥感影像,通过 ENVI 软件对影像进行预处理并采用监督分类法目视解译结合实际情况,将主城区分为水体、建设用地、绿地和农田 4 类土地利用类型,得到土地利用数据。

2.1.2 水系提取 通过影像的多波段融合并采用徐涵秋的改进归一化差异水体指数提取水系，进一步结合土地利用数据、谷歌影像人工解译得到主城区河流分布图(图 1)。

$$MNDWI=\frac{Green-MIR}{Green+MIR} \tag{1}$$

式中：Green，MIR 分别为绿波段和中红外波段，可增强水体与建筑物的反差，增加水体提取的准确[15]。

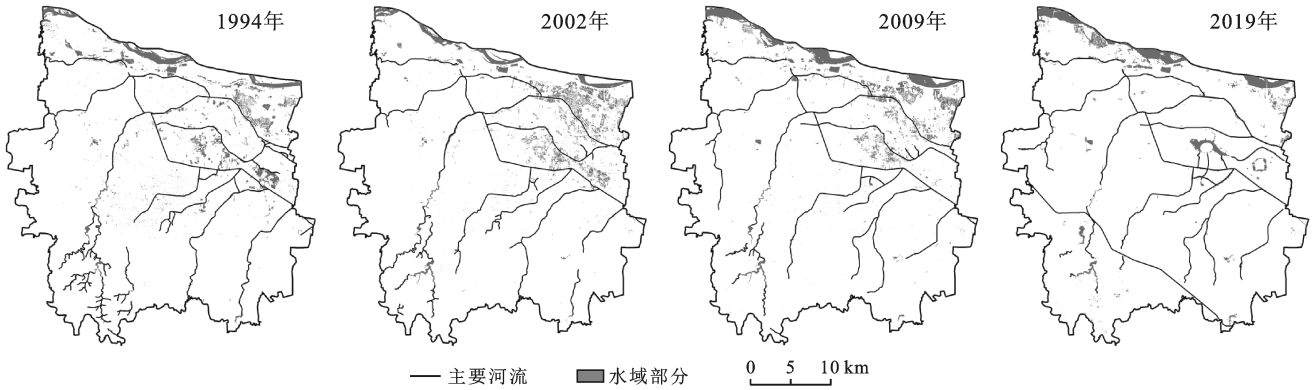


图 1 郑州市主城区 1994，2002，2009 和 2019 年河网变化

2.1.3 统计数据 城市发展数据来源于河南省郑州市统计局 1994，2002，2009 和 2019 年的《郑州市国民经济和社会发展统计公报》。

2.2 研究方法

2.2.1 网格化密度 网格化河网密度(D_r)：体现一定区域内河流分布的疏密程度，与地形坡度有紧密联系，值越大表明流域内地势平坦且调蓄能力强：

$$D_r=\frac{l}{r^2} \tag{2}$$

式中：l 为网格中河流长度；r^2 为网格面积。

河网密度与网格边长通常运用均值变点分析法进行突变点的检验[16]得到最佳网格尺度。

在有序数列$\{X_i\}$，$i=1,2,\cdots,N$ 中，以 X_i 点为界分为两段，计算每段样本的算术平均值和样本平均值，统计 S，S_i，两者差值最大时对应的点即突变点[17]。

$$S=\sum_{i=1}^{N}(X_i-\overline{X})^2 \tag{3}$$

$$S_i=\sum_{t1=1}^{i=1}(X_{t1}-\overline{X_{i1}})^2+\sum_{t2=i}^{N}(X_{t2}-\overline{X_{i2}})^2 \tag{4}$$

式中：$t_1=1,2,\cdots i-1$，$t_2=i,i+1,\cdots,N$ 分别代表以 X_i 点为界的两段样本。

2.2.2 河网特征指数

(1) 水面率(W)：该值越大河湖总面积越大。

$$W=\frac{a}{A}\times 100\% \tag{5}$$

式中：a 为河湖总面积(km^2)；A 为流域总面积(km^2)。

(2) 支流发育系数(K)：该值越大河网支流发育程度越好。

$$K=\frac{L_t}{L_m} \tag{6}$$

式中：L_t 表示支流总长度(km)；L_m 为干流总长度(km^2)。

(3) 主干流面积长度比(R_w)：该值越大则单位长度主干河流面积越大。

$$R_w=\frac{A_m}{L_m} \tag{7}$$

式中：A_m 为主干河流总面积(km^2)；L_m 为主干流总长度(km)。

(4) 河流曲度(S_r)：该值越大河流形态越自然化。

$$S_r=\frac{L}{L_s} \tag{8}$$

式中：L 流域内河流总长度(km)；L_s 流域内各条河流的直线距离之和(km)。

2.2.3 城市扩展强度 扩展强度(G)表示研究时间内主要建成区变化的快慢程度[18]。

$$G=\frac{L_b-L_a}{L_a}\times\frac{1}{t}\times 100\% \tag{9}$$

式中：L_a，L_b 为研究时段初期和末期主建成区的面积(km^2)；t 为研究时段长(年)。

2.2.4 耦合模型

(1) 标准化处理。采用极差标准化方法对原始数据进行无量纲处理，计算公式为：

$$S_{ij}=\frac{O_{ij}\min(O_j)}{\max(O_j)-\min(O_j)} \tag{10}$$

$$S_{ij}=\frac{\max(O_j)-O_{ij}}{\max(O_j)-\min(O_j)} \tag{11}$$

式中：S_{ij}，O_{ij} 分别为第 i 年的第 j 项指标的标准化值与原始数值；max，min 分别对应各年份中最大值和最小值[19]，其中，指标数据越大对系统发展越有利的正趋向性数据采用公式(10)，相反负趋向性数据采用公式(11)。

(2) 权重计算。采用主观与客观赋值相结合的办法[20],一级指标采用主观赋权法,二级指标利用客观赋值变异系数法计算权重,计算公式为:

$$\mathrm{CV}_j=\frac{D_j}{S_j} \tag{12}$$

$$W_j=\frac{\mathrm{CV}_j}{\sum_{j=1}^{n}\mathrm{CV}_j} \tag{13}$$

式中:CV_j 为标准化后第 j 项指标的变异系数;D_j 为标准化后第 j 项指标的标准差;S_j 为标准化后第 j 项指标的平均值[21]。

(3) 综合指数计算。为避免系统自身组成因素的稳定性、非线性过程的影响[22],利用线性加权法计算各系统综合指数,计算公式为:

$$E=\sum w_i e_i \quad (i=1,2,3,\cdots,n) \tag{14}$$

$$R=\sum w_j e_j \quad (j=1,2,3,\cdots,n) \tag{15}$$

式中:E,R 分别为城市化发展与河网演变系统的综合指数;W_i,W_j 分别为两个系统的第 i,j 项指标的权重值;e_i,e_j 分别为两个系统的第 i,j 项指标的标准化值。

(4) 耦合度与耦合协调度。反映城市发展与河网演变间的耦合程度,计算公式为:

$$T=a\times E+b\times R \tag{16}$$

$$C=\left\{(E\times R)/\left(\frac{E+R}{2}\right)^2\right\}^k \tag{17}$$

$$D=\sqrt{C\cdot T} \tag{18}$$

式中:T 为城市发展与河网演变系统的综合协调指数;C 为耦合度;D 为耦合协调度;a,b 为待定系数,取 $a=b=0.5$;k 为调节系数,这里 $k=2$。

耦合度 C 取值范围为[0,1],值越大表示发展越有序,但不能反映系统自身的发展水平,于是引入耦合协调度 D,划分标准根据廖重斌等学者的成果[23]以 0.5 为界大体分为失调和协调两个区间,具体划分详见表 1。

表 1　系统耦合协调等级[23]

耦合度 C	系统间关系	耦合协调度 D	协调关系
$C=0$	无序发展	0～0.09	极度失调
		0.1～0.19	严重失调
0<C≤0.3	低水平耦合	0.2～0.29	中度失调
		0.3～0.39	轻度失调
0.3<C≤0.5	拮抗阶段	0.4～0.49	濒临失调
		0.5～0.59	勉强协调
0.5<C≤0.8	磨合阶段	0.6～0.69	初级协调
		0.7～0.79	中级协调
0.8<C<1	高水平耦合	0.8～0.89	良好协调
		0.9～1.0	优质协调
$C=1$	有序发展		

3　结果与分析

3.1　城市发展对河网特征影响

3.1.1　最适格网密度分析　将网格边长分别设置为 1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0,4.5,5.0,5.5,6.0,6.5,7.0,7.5,8.0,8.5,9.0,9.5 和 10 km 共 19 个网格梯度,分别绘制网格边长与河网密度的关系图(图 2),得到研究区各个年份变化趋势均为随着网格边长的增加,河网密度不断下降,则河网密度与网格边长存在一定幂函数曲线关系。将数据分为两段样本,分别计算总体样本的平均值和方差以及分段样本的算术平均值和方差,绘制 S-S_i 与网格梯度的变化曲线图(图 2),结果显示 1994,2002,2009 和 2019 年这 4 a 变化趋势整体一致,均随着网格梯度的增加,S 与 S_i 的差值呈现出先增大后减小的变化趋势,前 3 个网格梯度下曲线上升趋势迅猛,在第 3 梯度处差值达到最大,在第 3 梯度后曲线逐步下降,符合均值变点法突变点的特征,则第 3 分割点即为格网密度的最佳网格尺度,与网格边长与河网密度关系图对应可得最适网格边长为 2 km。

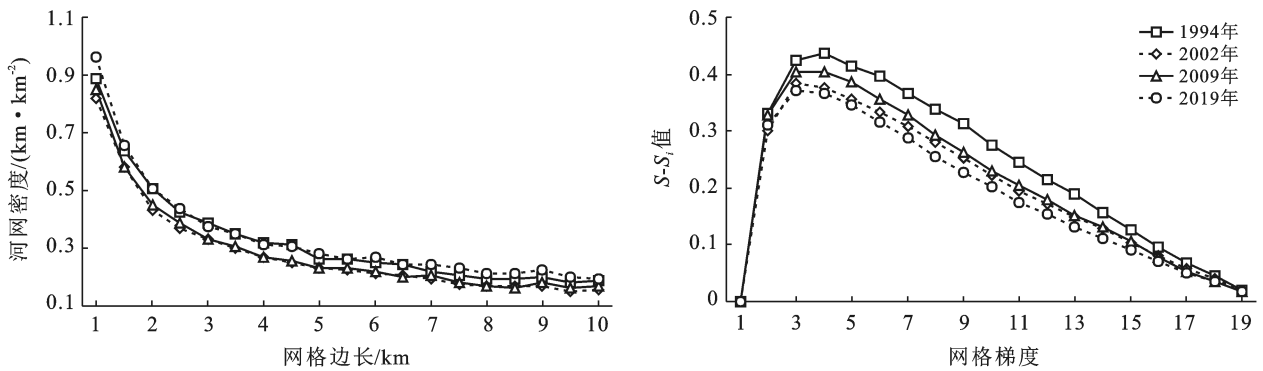


图 2　郑州市主城区最适单元网格分析

以 2 km×2 km 网格为标准，分别对 1994，2002，2009 和 2019 年河流单元网格密度进行分析得到整体密度降低、密集区块不断分散的变化特点，由 1994 年的两个主要高密度区演变为 2019 年中低密度区广散分布。其中西南部丘陵地区，受城市开发影响显著，密度降低最大，减小了 1.56；东部由于新区的规划建设使得主干河道得到一定保护，而支流明显减少，以龙子湖北部区域为例，初期河道支流丰富、形态自然化，随着城市进一步的建设发展，到 2019 年支流消失，河道渠干化。

本文以建设用地占比来表示土地城市化率，结合河网密度的变化进一步分析发现[24-25]，在研究时间段内河网密度随着土地城市化率的增加呈现先降后升的变化趋势。初期城市一味的发展忽视了对河网水系的保护与建设，建设用地不断扩张并开始挤压侵占河流用地，改变了土地利用类型，河道的减少较大程度地改变了河网的数量与布局，直接影响了河网密度等数量特征的变化，到后期人们开始注重河流生态的建设，疏通河道、开凿湖泊运河等人工生态水系的一些列措施的实施，提高了河流密度，一定程度改善了河网结构与布局。说明城市发展对河网既有破坏作用也有促进作用(图 3)。

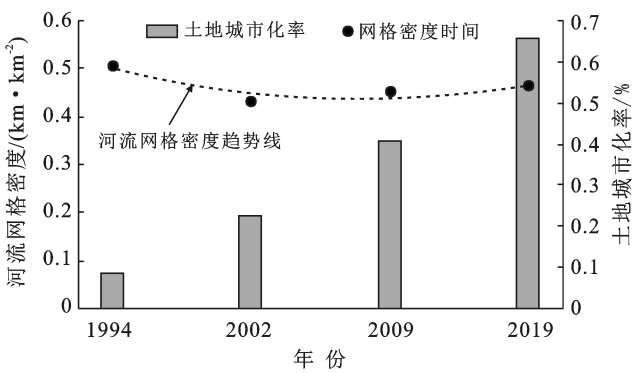


图 3 郑州主城区 1994，2002，2009 和 2019 年土地城市化率与河流格网密度关系

3.1.2 河网特征指数变化 通过对 1994，2002，2009 和 2019 年各项水系指数的计算可以得到，城市化带来的“他组织”效应对河网影响较大，地下水的过度开采导致河道水源减少，主干河流被硬质渠化、末端支流干枯消失，使河网支流数量明显减少、形态线型、结构单一化，特征指数整体呈现下降趋势(表 2)，1994—2019 年支流发育系数下降 0.13，水面率缩减了 0.78%。城市发展一方面通过用地挤压与资源索取的路径对河网演变产生破坏作用，另一方面则通过可持续发展与社会需求路径促进河网的发展。在政策指导与鼓励下，城市大步发展，而城市发展的突出表现即为土地利用的转变，随着人群向城市的涌入和硬质下垫面的增加，用地紧张导致建设用地开始挤压河流用地。同时对地下水的过度开发和对环境资源的过度索取，导致河流水源减少、末端支流干枯消失，加上河岸湿地的减少、河道渠化等极大的破坏了河网形态与结构，导致河网退化。而河网水系与城市储水排水、气候调节、环境安全等方面联系密切，河网的退化会带来水源减少、城市内涝、城市热岛、水污染等问题隐患，同时，人们开始重视生活质量，追求自然化的生活环境。因而，城市开始重视可持续性发展，从 2003 年郑州东区的建设开始，将河网建设纳入规划系统，到 2007 年《郑州市生态水系规划》的发布，采取疏通河道、微弯整治、支流改道等人工措施干预，再到 2015 年郑州市环城生态水系循环工程建设，建设生态引水工程和重要河流生态保护带限制性规划调控[26]的实施，使河网形态较长时期保持稳定，稳固了河网结构，特征指数也有所回升。如金水河，1992 年硬质河段约为 18.4 km，2000 年后快速发展使硬质河道在 2017 年达到 35 km，城区河道基本硬质化[27]，后期适当地人工干预，构建绿色生态廊道，形成以金水河为纽带，周边绿地公园环绕的空间格局；如潮河与魏河，拓宽河面并依托贾鲁河开凿湖面与运河打造人工水系，提高了河网特性，但仍存在河流走向线型的问题，说明在城市发展同时，对河网水系采取适当人工措施的干预对河流结构保护与重塑起到了一定促进作用，但仍需进一步加强对河网的修复与保护。

表 2 郑州主城区 1994，2002，2009 和 2019 年河网特征指数变化

水系参数	1994 年	2002 年	2009 年	2019 年	变化率		
					1994—2002 年	2002—2009 年	2009—2019 年
水面率/%	5.93	5.30	5.36	5.15	−0.63	+0.06	−0.21
支流发育系数	0.34	0.20	0.29	0.21	−0.14	+0.09	−0.08
干流面积长度比	0.07	0.06	0.05	0.06	−0.01	−0.01	+0.01
河流曲度/(km²·km⁻¹)	1.19	1.18	1.18	1.23	−0.01	0	+0.05

3.2　城市发展过程地形对河网演变的影响

河流的演变与地形也有较大联系,选取主城区的几何中心为圆心,适当半径画圆将主城区等分为北方(N)、东北方(NE)、东方(E)、东南方(SE)、南方(S)、西南方(SW)、西方(W)、西北方(NW)8 个方向,叠加不同时期下主要建成区矢量图,得到主城区各个方向在时间上的扩展情况。通过表 3 可以看出,郑州主城区在 NE-SE 和 NW-W 方向上扩展强度大,SW-S 方向上扩展强度最低,整体向东扩展。结合地形高程与河网可知,主城区总的地势为西南高东北低,河流走向为西南到东北,位于上游的西南地区地面沟壑纵横,开发难度大,同时南水北调干渠东西向穿过,水源保护也为城区向西南扩展增加了一定阻碍,扩展强度仅为 6.05%,仍使河网密度下降了 1.56,而东北部多为平原地区,地势平坦,且贾鲁河、金水河和索须河等在此区域交汇,NE-SE 区域扩展强度达 21.36%。则河网对城市发展的影响表现为支撑与约束作用:支撑作用通过城市扩展与物质供给路径体现:郑州主城区东部平原地区建设成本低,见效快,为龙湖、龙子湖、南北运河等人工水系的修建提供了便利,强化了东部地区的河网结构,主干河流影响着城市发展形态,支流控制引导着城市的扩张,因而东区生态水系与绿色廊道的进一步修建使之逐渐成为城市的支架与血脉,引导着城市扩展,并确保了水源和城市的生态循环、气候调节与水质净化,提供了城市发展必须的物质基础,支撑着城市的持续发展。约束作用则通过建设成本与环境质量路径体现:随着城市发展,人类活动的影响和对环境需求量的不断增加,硬质地面取代河道两岸滩地,河道渠化、水面缩小、水源减少、河流干枯等问题使河网水系的承受能力逐渐趋于阈值,生态平衡的破坏与环境质量的下降,增加了人工修复的经济损失,对生态脆弱地区更是带来不可逆的破坏而失去生存空间,这些都增加了城市建设成本,对城市的持续发展起到了一定约束作用。

表 3　郑州市主城区 1994,2002,2009 和 2019 年各方位扩展强度

项目	时间	N-NE	NE-E	E-SE	SE-S	SW-S	W-SW	NW-W	N-NW
建成区面积/km^2	1994 年	13.88	13.87	16.67	13.26	10.93	17.66	12.68	13.54
	2002 年	27.58	19.72	30.78	20.63	15.68	19.76	21.49	25.10
	2009 年	46.07	38.22	64.84	50.13	27.63	30.89	57.81	30.61
	2019 年	63.63	92.19	101.43	56.45	27.45	58.04	88.27	64.87
扩展强度/%		14.33	22.59	20.34	13.07	6.05	9.14	23.84	15.16

3.3　城市发展与河网水系的耦合协调分析

城市发展与河网具有相互限制、相互促进的关系。引用耦合模型,当城市发展水平较低时,河网对城市发展的约束力不大,耦合作用较低,随着城市发展对河流索取的增加,使河网系统的承受能力趋于阈值,开始阻碍城市的发展,于是城市规划建设者开始改善河网特性,提高承受力,缓和二者矛盾,使城市进一步发展,直到河网系统的承受力再次趋于阈值,如此往复,两者的耦合协调度也在过程中不断地调整、磨合、提升[28]。

3.3.1　*模型指标确定*　城市发展选择空间、经济和人口城市化三方面构建 6 个二级指标进行测算,河网演变则选取数量、结构、稳定性三方面构建了 5 个二级指标进行测算(表 4)。11 个指标中建设用地占比为负向型指标,即指标值越小越利于城市发展与河网演变的协调发展,其余 10 个指标均为正向型指标,即指标值越大越利于两者协调发展。衡量一个城市的发展程度离不开对空间、经济、人口三方面的分析,因此本文认为一级指标中 3 个方面对城市发展的贡献是相等的,基于权重总量为 1,则各项权重占比均为 0.333,同理,数量、结构和稳定性方面的描述对河网的演变分析同样重要,所以一级指标中三项权重均为 0.333。通过公式计算得到二级各项指标权重,发现河流曲度权重最大,为 0.30,最能反映城市发展对河网形态造成的影响,其次为人均 GDP,是衡量城市发展程度的重要指标。

3.3.2　*河网演变系统指数分析*　通过计算得到河网演变指数变化图(图 4),其中数量和结构特征曲线走势相近,整体上在波动中下降,在 1994—2002 年时间段内下降幅度最大,分别下降了 0.29 和 0.24,这时期受到我国房地产改革影响,住房建设兴起,较多河道分支等被侵占,导致河网支流数量减少、结构简化,干流受影响较小,因而河网稳定性即河流曲度初期呈现先增后降的变化。2002—2009 年时间内,快速城市化带来的一系列问题使河网达到了最大承受能力,开始影响到城市的发展,于是开始着手河流生态系统的恢复保护,基于《郑州市生态水系规划》的河道疏通、水质治理、人工运河开凿、引黄供水等措施达到良好的成效,河网特征指数缓慢回升,提高了河网系统的承载力,数量与结构指数分别提升了 0.07 和 0.05。

2009—2019 年时间内，内陆地区对旅游服务等第三产业的重视与新型工业化的不断发展进一步推动了城市的发展，对主要河道实施生态修复虽维护了河流稳定性，但城市发展对水生态系统带来的破坏存在不可逆性，支流的减少、结构的单一化，使河网发展远落后于城市发展，仍处于河网水系滞后型状态。

表 4 郑州市主城区城市发展与河网演变协调度评价指标体系指标权重

目标层	系统层	一级指标	权重	因素层	权重	趋向性
郑州市主城区城市发展与河网演变协调度评价指标体系	城市发展 E	空间城市化 E_1	0.333	建设用地面积	0.16	负向
				人均绿地面积	0.12	正向
		经济城市化 E_2	0.333	人均 GDP	0.23	正向
				第三产业比重	0.15	正向
		人口城市化 E_3	0.333	城镇人口比重	0.15	正向
				年末常住人口	0.19	正向
	河网演变 R	数量特征 R_1	0.333	河网格网密度	0.21	正向
				水面率	0.18	正向
		结构特征 R_2	0.333	支流发育系数	0.18	正向
				干流面积长度比	0.13	正向
		稳定性 R_3	0.333	河流曲度	0.30	正向

注：依据河南省郑州市统计局 1994，2002，2009 和 2019 年《郑州市国民经济和社会发展统计公报》计算整理。

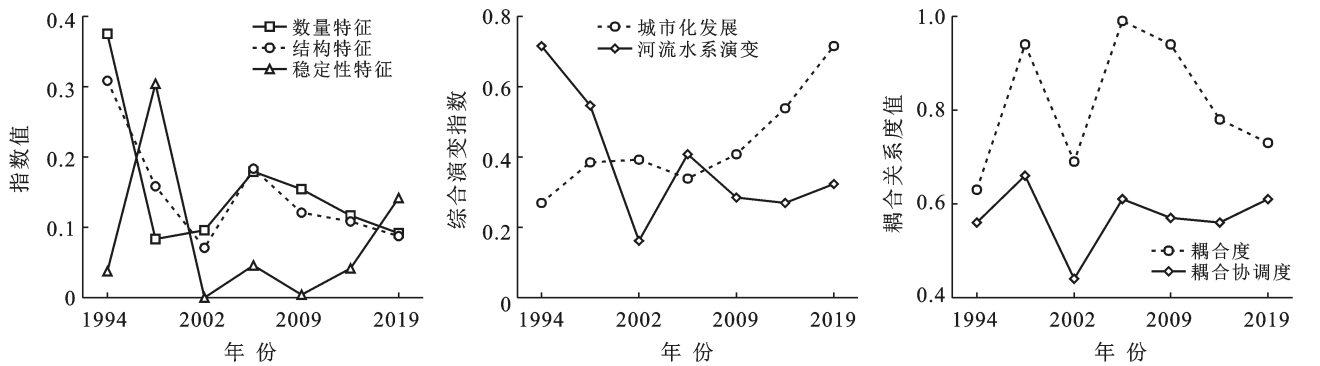


图 4 郑州市主城区城市发展与河网演变系统关系变化

3.3.3 城市发展与河网演变综合指数分析 通过城市发展和河网演变综合指数变化图(图 4)可以看出，在研究时间范围内郑州主城区的城市发展综合评价指数由 1994 年的 0.27 增加到 2019 年的 0.72，人均 GDP 从 1994 年的 0.49 万元上升到 2019 年的 11.31 万元，在小幅度变化中呈现明显上升的趋势，城市水平稳步提升。河网演变系统对城市发展带来的影响较为敏感，整体变化幅度大，有明显的响应。在 1994—2002 年时间内，河网受城市发展影响综合指数直线下降了 0.56，水系的持续恶化反作用阻碍了城市的发展，2002—2006 年，城市发展减缓，同时河道的微弯整治、变化的河岸滩地、部分河道支流的改道等建设措施，提高了河网承载力，综合指数回升，2006 年之后，城市发展加快，表现为河网演变滞后型，但对河流的长期规划建设使河网曲线随着城市发展呈稳中略升的趋势。

综合两者变化曲线，城市发展与河网演变两者差值先缩小再反向增大再到逐渐缩小，经历了城市发展滞后型到河网演变滞后型，说明初期城市一味地追求高速度、高密度、高强度的发展而忽视了城市河流生态环境的承载力，渠道化、结构单一化、主干化及河水污染等给河网水系生态系统造成了一定不可逆的破坏，而且对河网水系的保护规划开始较晚，修复及成效落后于城市发展进程，因而城市发展综合指数仍高于河网的综合指数。

3.3.4 城市发展与河网演变耦合关系分析 ①由图 4 可以看出，研究时间范围内，两系统的耦合度值处于 0.63～0.94 之间，在磨合阶段与高水平耦合间的波动幅度较大，在研究时间段前后整体有所提高。两者耦合协调度的值从 1994 年的 0.56 到 2019 年的 0.61，其过程可分为 3 个时期：波动阶段(1994—2002 年)。这一时期两系统间协调度波动幅度大，对照表 1 协调等级可知，1994 年的协调度为 0.56 处于勉强协调阶段，2000 年的协调度则高达 0.66 处于初级协调阶段，

而 2002 年降到 0.44 处于濒临失调阶段。说明初期城市发展水平较低,随着不断的发展对河流的依赖与利用不断提升,接着不透水面的增加、用地挤压、河道占用使河网综合指数从 0.72 下降到 0.16,河网承受力趋于阈值,带来水质污染、河道断流、环境变差等一系列城市问题,并反向影响了城市的发展进程,两者协调度急速下滑。② 磨合阶段(2002—2014 年)。这一阶段属于两者的磨合调整期,城市问题的出现使得人们开始重视河网系统的建设,2007 年《郑州市生态水系规划》的发布与实施使取得了一定成效,水质初步改善、水面得到扩张、水循环加强,河网综合指数由 2002 年的 0.16 增加到 2014 年的 0.27,提高了河网的整体水平,因此城市得以进一步发展,两者协调度增加,2006 年达到 0.61 处于初级协调阶段。但城市的发展仍高于河网系统的发展,会再次达到河网系统的承受阈值,因而两者协调度由 2006 年的 0.61 下降到 2014 年的 0.56 处于勉强协调阶段。③稳发展阶段(2014—2019 年)。河流水系保护建设的实施有效缓解了河网生态的进一步恶化,因而在城市发展的同时也开始注重河网体系的修复与合理发展。从广泛的污水治理和拓宽河道落实到针对贾鲁河、索须河等具体河流的综合治理,再到环城生态水系工程的实施,河流廊道和湿地生态的建设使得城市河流水面宽了、水质清了、水体动了。此时期在城市持续发展下河网综合指数在 2019 年增加到 0.32,两系统间的协调度也提升到 0.61 处于初级协调等级。虽然两者协调度已处于初级协调阶段,并呈稳步上升趋势,但是两者的耦合协调发展过程具有一定波动性,因而在之后的发展过程中仍应重视并加强对城市河流水系的保护与修复,并逐渐减弱河网对“他组织”作用的依赖,通过生态修复与改造,提高河流水系系统自身的恢复力,使两系统向协调共生阶段发展。

4　讨论与结论

(1) 城市发展对河网具有破坏与促进作用。城市发展初期较大程度的改变了河网的形态与结构,水面缩减、结构单一化,特征指数整体呈下降趋势,空间布局也由高密度集中转向中低密度分散,西南区域河网密度下降明显,减少了 1.56;后期关于水系保护建设政策与人工措施的发布实施缓解了水系的进一步退化,对河网的保护起到一定成效。

(2) 河网也支撑并约束着城市的发展。因西南部丘陵地貌导致建设成本大,扩展强度仅为 6.05%,而东部平原地区开发成本低,见效快,推动了东区湖泊、运河等人工水系的建设,稳固了河网水系,也引导着城市的扩展,NE－SE 区域扩展强度达 21.36%。同时随着城市发展,环境压力增大,河网的承受能力趋于阈值,生态平衡的破坏增加了城市建设成本,约束着城市的持续发展。

(3) 城市发展与河网演变耦合协调变化可分为波动、磨合和稳发展 3 个阶段,从初期城市的一味发展,对水系带来了严重影响,河网系统指数下降了 0.56;到开始重视河网的保护与建设,一系列人工措施的干预缓解了河网的恶化,两者耦合协调度增加了 0.12;后期对水系的综合治理与修复成效显著,河网综合指数增加了 0.05,两者协调度也提升到了 0.61,处于初级协调等级。但其发展过程具有一定波动性,因而在之后的发展过程中仍应重视并加强对城市河网水系的保护与修复,逐步恢复提升河网系统自身的发展活力。

下一步可选取更全面的指标体系评价,结合人工措施的干预对趋势进行预测分析,对调整河网形态,合理分配雨水资源,构建与城市相匹配的河网水系提出建议。

[参 考 文 献]

[1] 杨凯,袁雯,赵军,等.感潮河网地区水系结构特征及城市化响应[J].地理学报,2004,59(4):557-564.

[2] 袁雯,杨凯,唐敏,等.平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J].地理研究,2005,24(5):717-724.

[3] Hollis G E, Luckett J K. The response of natural river channels to urbanization: Two case studies from South-east England [J]. Journal of Hydrology, 1976,30(4): 351-363.

[4] Yang Long, Tian Fuqiang, Niyogi Dev. A need to revisit hydrologic responses to urbanization by incorporating the feedback on spatial rainfall patterns [J]. Urban Climate, 2015,12(2):128-140.

[5] 田国行.城市绿地景观规划的理论与方法[D].北京:中国农业大学,2005.

[6] Surian Nicola, Rinaldi Massimo. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy [J]. Geomorphology, 2003,50(4):307-326.

[7] Steele M K, Heffernan J B, Bettez N, et al. Convergent surface water distributions in US cities [J]. Ecosystems, 2014, 17(4): 685-697.

[8] Napieralski Jacob A, Carvalhaes Thomaz. Urban stream deserts: Mapping a legacy of urbanization in the United States [J]. Applied Geography, 2016,67(2):129-139.

[9] 袁雯,杨凯,吴建平.城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨[J].地理科学,2007,27(3):401-407.

[10] 蒋祺,郑伯红.城市用地扩展对长沙市水系变化的影响

[J].自然资源学报,2019,34(7):1429-1439.
[11] Yang Liu, Xu Youpeng, Han Longfei, et al. River networks system changes and its impact on storage and flood control capacity under rapid urbanization [J]. Hydrological Processes, 2016,30(13):2401-2412.
[12] 韩龙飞,许有鹏,雷超桂,等.长江三角洲水系退化研究(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26(6):694-706.
[13] 张振龙.新疆城镇化与水资源耦合协调发展研究[D].新疆 乌鲁木齐:新疆大学,2018.
[14] 王玮,唐德善,金新,等.基于系统动态耦合模型的河湖水系连通与城市化系统协调度分析[J].水电能源科学,2015,33(7):20-24.
[15] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,33(5):589-595.
[16] 陈希孺.变点统计分析简介[J].数理统计与管理,1991,10(1):55-58.
[17] 吴雷,许有鹏,徐羽,等.平原水网地区快速城市化对河流水系的影响[J].地理学报,2018,73(1):104-114.
[18] 王启名,杨昆,许泉立,等.滇池流域土地利用格局变化的地形梯度效应[J].水土保持通报,2017,37(4):106-113,118.
[19] 刘永婷.城市发展对嘉兴市水系连通影响及其与水资源耦合关系研究[D].安徽 芜湖:安徽师范大学,2018.
[20] 陈东景,徐中民.西北内陆河流域生态安全评价研究:以黑河流域中游张掖地区为例[J].干旱区地理,2002,25(3):219-224.
[21] 李晨昱.西安城市水系演变与城市发展的关系研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2017.
[22] 崔子豪.西安市城市化过程与用水耦合关系研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2017.
[23] 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):3-5.
[24] 王洋,王少剑,秦静.中国城市土地城市化水平与进程的空间评价[J].地理研究,2014,33(12):2228-2238.
[25] 白天.漯河城市地表景观对雨洪资源时空分配的影响[D].河南 郑州:河南农业大学,2019.
[26] 王恒伟,严金明,陈萌.快速城市化地区土地资源承载力空间分异研究:以广东东莞市为例[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(11):141-148.
[27] 胡艳芳,田国行.郑州市水系整治的生态学途径探讨[J].西南林业大学学报,2011,31(5):67-71.
[28] 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):211-217.

(上接第214页)

[21] 陈腊,米国华,李可可,等.多功能植物根际促生菌对东北黑土区玉米的促生效果[J].应用生态学报,2020,31(8):2759-2766.
[22] 谷端银,王秀峰,魏珉,等.腐植酸类物质与植物抗逆性研究进展[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(3):321-326.
[23] 王相平,杨劲松,张胜江,等.改良剂施用对干旱盐碱区棉花生长及土壤性质的影响[J].生态环境学报,2020,29(4):757-762.
[24] 庞志强,余迪求.干旱胁迫下的植物根系—微生物互作体系及其应用[J].植物生理学报,2020,56(2):109-126.
[25] 杨坤,于季红.土壤多糖的研究进展[J].中国农学通报,2014.30(36):222-225.
[26] Khoshru Bahman, Mitra Debasis, Khoshmanzar Elaheh, et al. Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: An economic valuable resource for the agriculture revival under stressful conditions [J]. Journal of Plant Nutrition, 2020,43(20):3062-3092.
[27] 李婧男,孙向阳,李素艳.有机无机改良剂对滨海盐渍化土壤酶活性和土壤微生物量的影响[J].水土保持通报,2019,39(5):160-165.
[28] Luan Haoan, Gao Wei, Tang Jiwei, et al. Aggregate-associated changes in nutrient properties, microbial community and functions in a greenhouse vegetable field based on an eight-year fertilization experiment of Chian [J]. Journal of Integratine Agriculture, 2020,19(10):2530-2548.
[29] 纪磊,岳鑫,陈磊,等.生物质炭和秸秆对土壤团聚体腐殖物质组成的影响[J].山东农业科学,2019,51(1):91-97.