

基于随机森林模型的黄河流域城市建设用地结构时空演化及其驱动机制研究

郭远智¹, 李许红^{1,2*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:城市是区域人口、产业等要素集聚的主要空间载体,系统揭示黄河流域城市建设用地结构演化及其驱动机制对于深入推进黄河流域生态保护和高质量发展战略落实具有重要意义。基于黄河流域2007—2019年城市建设用地数据,论文运用信息熵模型分析了黄河流域城市建设用地结构的时空演化特征,并用随机森林模型探讨其驱动机制。结果表明:① 2007—2019年,黄河流域城市建设用地面积快速增长,年均增速达5.34%,但城市建设用地结构信息熵不断降低,经历了“高位无序—相对稳定—低位有序”的变化过程;② 黄河上、中、下游城市建设用地规模增速依次加大,年均增速分别达到3.91%、5.06%、6.22%;中游地区城市建设用地结构信息熵下降最多,上游地区和下游地区降幅相近;③ 黄河流域各类建设用地主要配置在省会及经济发达城市;黄河流域城市用地结构信息熵存在空间异质性,省会城市及经济发达城市建设用地结构信息熵存在降低趋势,而欠发达城市的信息熵逐步增大;④ 城市用地规模和城市人口规模对城市建设用地结构演化的作用最强,产业结构升级和财政支出规模的作用强度次之,经济发展水平和政策支持力度的作用较小,上中下游影响因子的作用强度存在异质性;⑤ 城市用地规模、城市人口规模、财政支出规模与城市建设用地结构信息熵呈正向变动关系,经济发展水平和产业结构升级与城市建设用地结构信息熵呈负向变动关系,政策支持力度则与城市建设用地结构信息熵呈现出“倒U”型关系。

关键词:城市建设用地;信息熵;随机森林模型;高质量发展;黄河流域

改革开放以来,中国经历了人类历史上最快速的城镇化进程^[1-2]。到2020年,城镇常住人口达到9.02亿人,城镇化率由1978年的17.92%增长到63.89%^[3]。在这一过程中,城市建设用地快速增加,城市空间结构持续调整,引起城市地域空间的重构,深刻影响着区域要素资源的配置及区域主导功能的发挥^[4-5]。

围绕城市用地结构变化及其驱动机制,学界从不同角度开展了深入的研究,发现不同城市用地结构存在差异,综合性城市信息熵大于专业化城市信息熵^[6]、沿海城市信息熵大于内陆地区^[7]、城市化过

程中郊区信息熵上升^[8]等城市用地结构的熵值演化规律。诸多学者还引入均衡度模型^[9]、偏移一份额模型^[10]、基尼系数^[11]、城市生态算法^[12]等模型方法探讨了县域^[13]、市域^[14-15]、省域^[16]、城市群^[17]等不同空间尺度城市建设用地结构的配置格局、时空演化特征以及优化调整方向。作为一个耦合资源、环境、人文、经济等诸多要素的复杂巨系统^[18],城市土地利用系统演化受内部推力和外部拉力的复合影响^[19]。在定性剖析之外,主成分分析法^[20]、灰色关联模型^[21]、计量回归模型^[22]等定量分析方法被广泛应用于揭示自然地理、产业结构、政策法规等因素

收稿日期:2022-06-22;修订日期:2022-09-27。

基金项目:国家自然科学基金项目(42001203)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42001203.]

第一作者简介:郭远智(1990—),男,江西南康人,博士,副研究员,主要从事城乡转型与区域可持续发展研究。

E-mail: guoyz.16b@igsnrr.ac.cn

*通信作者简介:李许红(2000—),男,河南南阳人,博士生,主要从事土地利用与区域可持续发展、乡村地域系统及乡村振兴研究。E-mail: lixuhong2479@igsnrr.ac.cn

引用格式:郭远智,李许红. 基于随机森林模型的黄河流域城市建设用地结构时空演化及其驱动机制研究[J]. 地理科学进展, 2023, 42(1): 12-26. [Guo Yuanzhi, Li Xuhong. Spatiotemporal change of urban construction land structure and driving mechanism in the Yellow River Basin based on random forest model. Progress in Geography, 2023, 42(1): 12-26.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.01.002

对城市用地空间布局变化的驱动机理研究,并逐步成为主要的研究方法。

作为人类活动高度集聚的地理空间,城市是区域发展的战略支点^[23]。科学探讨城市土地利用变化对于系统解决区域社会经济发展过程中遇到的问题和难题,实现区域高质量发展具有重要意义。2019年,黄河流域生态保护和高质量发展成为国家战略,要求不断优化流域“三生”空间,实现人—地—业耦合协调。然而,在长期发展过程中,黄河流域城市普遍存在“摊大饼”式无序扩张蔓延、建设用地结构失衡、产业集聚区用地结构不合理等问题。土地利用作为人类活动的一面镜子,通过调控土地利用方式及其结构可以改变特定区域内人地交互作用和要素配置^[24-25]。因此,系统分析黄河流域城市建设用地变化及其结构的演进特征,剖析其背后的形成机制,有助于制定针对性的政策和措施以调整和优化黄河流域城市空间格局,夯实区域高质量发展的支撑。利用2007—2019年黄河流域城市建设用地数据,本文探讨黄河流域城市建设用地规模的演化特征,利用信息熵模型剖析黄河流域城市用地结构的动态变化,并使用随机森林模型分析驱动因子的作用强度及其区域差异,以期为黄河流域生态保护和高质量发展决策提供参考和借鉴。

1 研究区域、方法与数据

1.1 研究区概况

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省(区),涉及71个地级市(州、盟)和1个县级市(济源市)。以内蒙古自治区托克托县河口镇和河南省荥阳市桃花峪为界,黄河流域划分为上游、中游和下游(图1)。根据全国主体功能区规划,黄河流域内分布有3个区域级城市群和4个地区性城市群^[26-27],是黄河流域高质量发展的增长极点和核心连接点。受限于不同地区自然资源禀赋和社会经济发展的空间异质性,黄河流域高强度国土开发、低效土地利用、不合理用地布局等问题普遍存在,严重制约区域生态保护和高质量发展^[28]。基于数据的可获取性,剔除未设置市辖区的阿坝州、临夏州、甘南州、海北州、黄南州、海南州、果洛州、玉树州、海西州、阿拉善盟和济源市,同时数据缺失严重的海东市亦不纳入分析,由此共获得60个地级市作为研究对象。2020年,流域内这

60个地级市的年末常住人口约为2.38亿人,其中城市市辖区的常住人口总规模为1.05亿人,城市建设用地面积为8591.74 km²。

1.2 研究方法

1.2.1 信息熵模型

信息熵模型被广泛用于城市土地利用结构的研究中,用于揭示土地利用系统的有序性和多样性^[29]。本文中城市建设用地结构的信息熵具体计算公式如下:

$$A = \sum_{i=1}^N A_i \quad (1)$$

$$P_i = \frac{A_i}{A} \quad (2)$$

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \quad (3)$$

式中: A 为某城市建设用地总面积; A_i 为某城市*i*地类的面积; N 为建设用地种类数; P_i 为某城市地类*i*的面积与建设用地总面积的比值; H 为某城市的建设用地结构信息熵。当 $P_1=P_2=P_3=\dots=P_N$ 时,城市建设用地结构的信息熵达到最大值,为 $\ln N$ 。由于本文将各城市的建设用地类型划分为7类(具体见1.4节),即各城市的土地职能数相等,因此可直接使用信息熵来比较城市之间用地结构的均衡性,信息熵值越大表明各类建设用地规模相当,该城市的用地结构越均衡。同时,信息熵也表征城市用地系统的无序化程度,熵值越高表示城市用地系统的有序性越低,反之则越高^[30]。

1.2.2 随机森林模型

随机森林(Random Forest)是Breiman^[31]于2001年提出的一种包含多个决策树分类器的机器学习算法。一般使用bootstrap重抽样方法从原始样本中抽取多个样本,并对每个bootstrap样本进行决策树建模,然后将这些决策树的预测组合通过投票得出最终预测结果^[31-32]。随机森林模型由于其独特的算法优势,使得其在处理多重共线性变量或非平衡数据时也能够得到精度较高的预测结果,不仅可以用来做聚类和判别分析,还可以用来进行回归分析以探究影响因子的重要性^[33]。本文采用R语言进行随机森林模型运算,构建各驱动因子与建设用地结构信息熵的回归分析模型,进而基于均方误差增加量(IncMSE)、节点纯度增加量(IncNodePurity)分析影响因子驱动力大小。IncMSE指将变量随机取值后进行随机森林模型估算误差相对于原来误差的升高幅度,值越大表明变量越重要;IncNodePurity

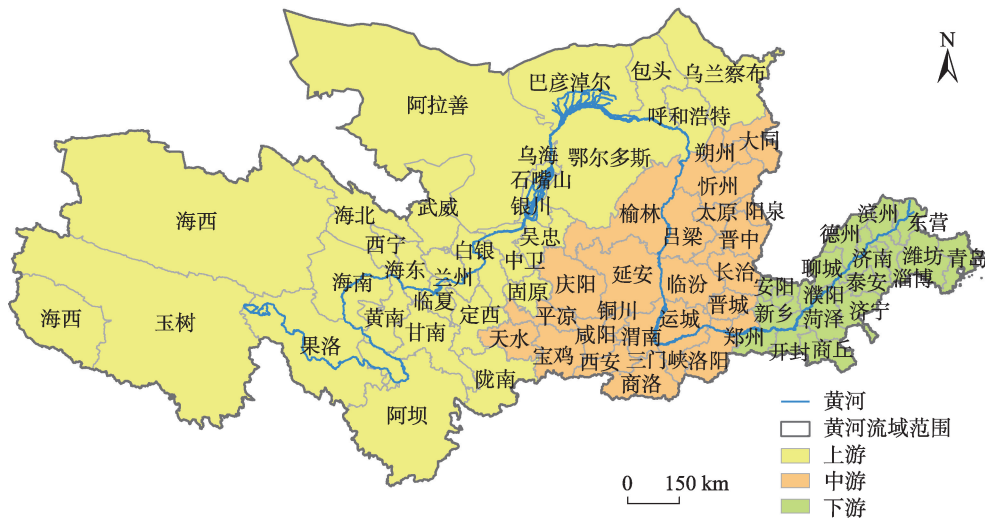


图1 研究区示意图

Fig.1 The study area

反映变量对各个决策树节点的影响程度,值越大表明变量越重要。在保证计算效率的前提下^[34],经过多次调试,本文参数最终设置如下:ntree=500, mtry=3,其他均为默认值。

1.3 影响因素预选取

依据推拉理论,在城市地域系统内部要素结构变迁的“推力”和系统外部宏观经济社会变化的“拉力”的综合作用下,城市建设用地不断实现空间调整和功能重组^[19]。已有研究表明,在城市规模不断扩张过程中,新增建设用地的地类配置会对整个城市建设用地结构信息熵产生影响^[35]。为衡量城市用地规模与用地结构信息熵的内在关联,选取城市建设用地面积作为城市用地规模的代理指标。人口规模是影响城市用地结构演化的直接因素^[19,36],选取城市年末人口数量分析黄河流域城市人口规模对用地结构的影响。经济发展水平变化间接作用于城市用地规模和结构^[18],城市居民人均收入反映居民在消费、投资、储蓄等方面的支付能力,是经济增长红利惠及城市居民的重要表征,能够反映经济实效发展水平,但由于市辖区内城市居民人均可支配收入数据缺失,而工资性收入占可支配收入的份额较大,因此,本文选择职工年平均工资作为经济发展水平的代理指标来分析其对用地结构的作用强度。产业结构升级将促使劳动力、资本和土地在不同产业间流动^[37],影响不同产业在用地竞争中的优劣势,是城市用地结构演变的内部驱动力^[19],本文选取三产产值与二产产值的比值作为产业结

构升级的代理指标,并测度其对用地结构的影响。政府通过财政资金投入进行城市基础设施建设和改善公共服务供给会改变地类组合,是城市用地结构变化的外在驱动力^[11,18],本文选取一般公共预算支出衡量财政支出规模对用地结构的影响。地方政府对房地产开发建设的支持力度会影响用地结构演化的速率^[38-39],本文选取房地产开发投资额占城市GDP的比重来表征城市政策支持力度。在已有研究的基础上,本文从城市用地规模、人口规模、经济发展水平、产业结构、财政支出规模、政策支持力度等角度预选取黄河流域城市建设用地结构信息熵变化的驱动因素(表1)。

1.4 数据来源与处理

本文使用的城市建设用地数据来源于《中国城市建设统计年鉴(2007—2019年)》;各城市年末人口、二三产业产值、地方财政一般公共预算支出、房地产开发投资额、地区生产总值等社会经济数据来源于《中国城市统计年鉴(2008—2020年)》、各地市统计年鉴以及国民经济和社会发展统计公报,统计范围均为市辖区。城市建设用地结构数据分类涉及《城市用地分类与规划建设用地标准(GBJ137—90)》和《城市用地分类与规划建设用地标准(GB50137—2011)》新旧2套标准。参考许芸鹭等^[17]的成果,本文将城市建设用地类型划分为居住用地、公共设施用地、工业用地、仓储用地、道路交通用地、市政公用设施用地和绿地与广场用地7大类。

表1 黄河流域城市建设用地结构演变的驱动因素预选取

Tab.1 Pre-selection of driving factors for urban construction land structural change in the Yellow River Basin

| 变量 | 变量名称 | 变量符号 | 含义 | 单位 |
|-------|----------|-------|-------------|-----------------|
| 被解释变量 | 城市建设用地结构 | Y | 建设用地结构信息熵 | Nat |
| 解释变量 | 城市用地规模 | X_1 | 城市建设用地面积 | km ² |
| | 城市人口规模 | X_2 | 城市年末人口 | 万人 |
| | 经济发展水平 | X_3 | 职工年平均工资 | 元 |
| | 产业结构升级 | X_4 | 三产产值/二产产值 | — |
| | 财政支出规模 | X_5 | 一般公共预算支出 | 亿元 |
| | 政策支持力度 | X_6 | 房地产开发投资/GDP | — |

2 结果分析

2.1 黄河流域城市建设用地的总体演变特征

2007—2019年,黄河流域城市建设用地规模快速增长,由4502.93 km²增长至8408.21 km²,年均增速达到5.34%(图2),其中上游、中游和下游的年均增速分别达到3.91%、5.06%和6.22%。相应地,上中下游城市建设用地规模在黄河流域中的占比从2007年的23%:34%:43%演化为2019年的19%:33%:48%。从类型来看,绿地与广场用地面积增长最快,由448.61 km²剧增至1104.37 km²,年均增速为7.80%;公共设施用地、道路交通用地和居住用地面积的年均增速超过研究区平均水平,分别达到7.18%、5.87%和5.68%;仓储用地、工业用地和市政公用设施用地面积的年均增速均小于研究区平均水平。

从建设用地结构的时序变化来看,2007—2019年,各地类中居住用地面积占比一直最高,约为

30%,并且呈现波动上升趋势(表2)。究其原因,主要是在黄河流域快速的工业化和城镇化进程中,农业人口大量向城市转移,对城市居住用地的需求激增。加之地方政府“土地财政”的发展模式,城市居住用地规模高位运行。工业用地面积占比为20%左右,是占比第二的用地类型,其份额在研究期内逐步降低。这主要是因为国家在这一时期加大了对工业土地利用效率和转型升级的调控力度,如2011年国务院印发的《工业转型升级规划(2011—2015年)》,抑制了工业用地的增长,使得工业用地增速低于研究区平均水平,其在土地利用结构中的占比亦不断降低。公共设施用地、道路交通用地、绿地与广场用地的面积占比保持在10%~20%之间,市政公用设施用地和仓储用地面积占比在10%以下。

从黄河流域城市建设用地结构信息熵来看,城市建设用地信息熵值在2007—2019年逐步减小,从1.7778 Nat降至1.7337 Nat(表2)。根据图2a中信息熵时序变化曲线,可将信息熵演化过程划分为“高

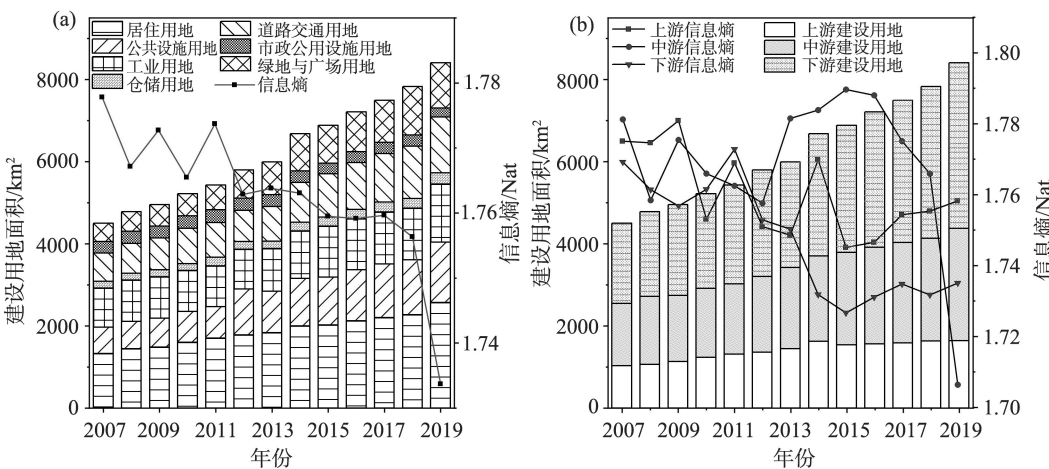


图2 2007—2019年黄河流域城市建设用地变化及其信息熵

Fig.2 Changes and information entropy of urban construction land in the Yellow River Basin during 2007–2019

表2 2007—2019年黄河流域城市建设用地结构及信息熵

Tab.2 Urban construction land use structure and information entropy in the Yellow River Basin during 2007—2019

| 年份 | 城市建设用地结构/% | | | | | | | 信息熵/ Nat |
|------|------------|--------|-------|------|------------|--------------|---------|-------------|
| | 居住用地 | 公共设施用地 | 工业用地 | 仓储用地 | 道路交 通用地 | 市政公用 设施用地 | 绿地与广场用地 | |
| 2007 | 29.45 | 14.18 | 21.23 | 3.73 | 15.23 | 6.22 | 9.96 | 1.7778 |
| 2008 | 30.16 | 13.92 | 21.12 | 3.38 | 15.32 | 6.10 | 10.01 | 1.7672 |
| 2009 | 29.96 | 14.23 | 20.28 | 3.48 | 15.66 | 5.89 | 10.50 | 1.7727 |
| 2010 | 30.62 | 14.35 | 19.19 | 3.22 | 16.45 | 5.81 | 10.38 | 1.7655 |
| 2011 | 31.29 | 14.21 | 18.28 | 3.81 | 15.59 | 5.77 | 11.05 | 1.7737 |
| 2012 | 30.72 | 19.36 | 16.63 | 3.34 | 12.97 | 5.19 | 11.78 | 1.7629 |
| 2013 | 30.57 | 16.88 | 17.29 | 3.04 | 14.06 | 4.90 | 13.26 | 1.7638 |
| 2014 | 29.97 | 17.32 | 17.27 | 3.20 | 14.46 | 4.28 | 13.50 | 1.7631 |
| 2015 | 29.34 | 17.02 | 17.97 | 3.21 | 15.28 | 3.72 | 13.46 | 1.7595 |
| 2016 | 29.47 | 17.18 | 17.24 | 3.21 | 15.74 | 3.70 | 13.46 | 1.7591 |
| 2017 | 29.38 | 17.44 | 16.83 | 3.26 | 15.73 | 3.61 | 13.74 | 1.7596 |
| 2018 | 29.08 | 17.05 | 16.05 | 3.00 | 16.29 | 3.43 | 15.11 | 1.7563 |
| 2019 | 30.61 | 17.46 | 16.80 | 3.24 | 16.17 | 2.59 | 13.13 | 1.7337 |

位无序(2007—2011年)”“相对稳定(2012—2017年)”“低位有序(2018—2019年)”3个阶段。具体来看,2007—2011年,7大类建设用地规模均稳步增长,流域城市用地结构较为均衡,信息熵在1.77 Nat左右徘徊。2012—2017年,城市用地结构的有序度变动较小,信息熵在1.76 Nat左右保持相对稳定。具体来看,黄河流域城市公共设施用地和市政公用设施用地面积占比分别从19.36%和5.19%降至17.44%和3.61%,道路交通用地和绿地与广场用地面积占比分别从12.97%和11.78%增至15.73%和13.74%,其他用地类型规模占比基本稳定。2018—2019年,规模最大的居住用地占比进一步提高,而规模最小的市政公用设施用地占比进一步降低,促使城市用地系统的有序度提高,信息熵迅速降低。

从流域层面来看,2007年各流域城市建设用地信息熵差异较小,并且上游、中游和下游地区信息熵均随着时间推移波动下降,降幅分别达到0.0227、0.0680和0.0248 Nat(图2b)。其中,中游信息熵下降最多,上游和下游降幅相近,其背后的主要原因是黄河上中下游城市各类建设用地规模的异速增长及其对各自流域内城市用地系统有序度的差异性影响。对上游和下游来说,市政公用设施用地面积占比下降是城市用地结构信息熵降低的主要原因,占比分别从2007年的6.14%和5.88%下降至2019年的3.21%和2.54%,助推城市用地系统的有序度提升,并导致信息熵降低。对中游来说,

规模最大的居住用地占比由2007年的28.94%升至2019年的33.49%;市政公用设施用地面积占比从6.73%降至2.29%,并替代仓储用地成为规模最小的用地类型。城市用地系统的演化导致各类型用地规模占比的极差增大和用地结构的非均衡度上升,城市用地系统有序度明显提升,信息熵下降较多。

2.2 黄河流域建设用地结构的时空格局

从黄河流域城市各类建设用地时空格局来看(图3),2007年黄河流域60个地级市城市居住用地面积均值为22.10 km²,高值城市集中在下游,其中济南市面积最大,达到79.31 km²。到2019年,随着城市规模的快速扩张和市区常住人口规模的提高,政府投入大量资源进行房地产开发建设,促使黄河流域城市居住用地面积均值上升至42.90 km²,并有75%的城市居住用地规模超过15 km²,其中西安市的居住用地面积最大,达到246.08 km²。就公共设施用地而言,黄河流域各城市公共设施用地面积在2007年普遍低于20 km²。但是,到2019年,有36.67%的城市公共设施用地面积超过20 km²,其中济南市的面积最大,达到152.63 km²,表明地方政府在经济快速发展过程中不断推进公共设施建设以满足居民生产生活的需要。2007—2019年,黄河流域路网密度进一步提升,交通网络体系日渐完善,基本建成了郑州、西安、青岛等一批综合交通枢纽城市,助推城市道路交通用地面积均值从11.43 km²提高为22.66 km²,并有40%的城市道路交通用地面

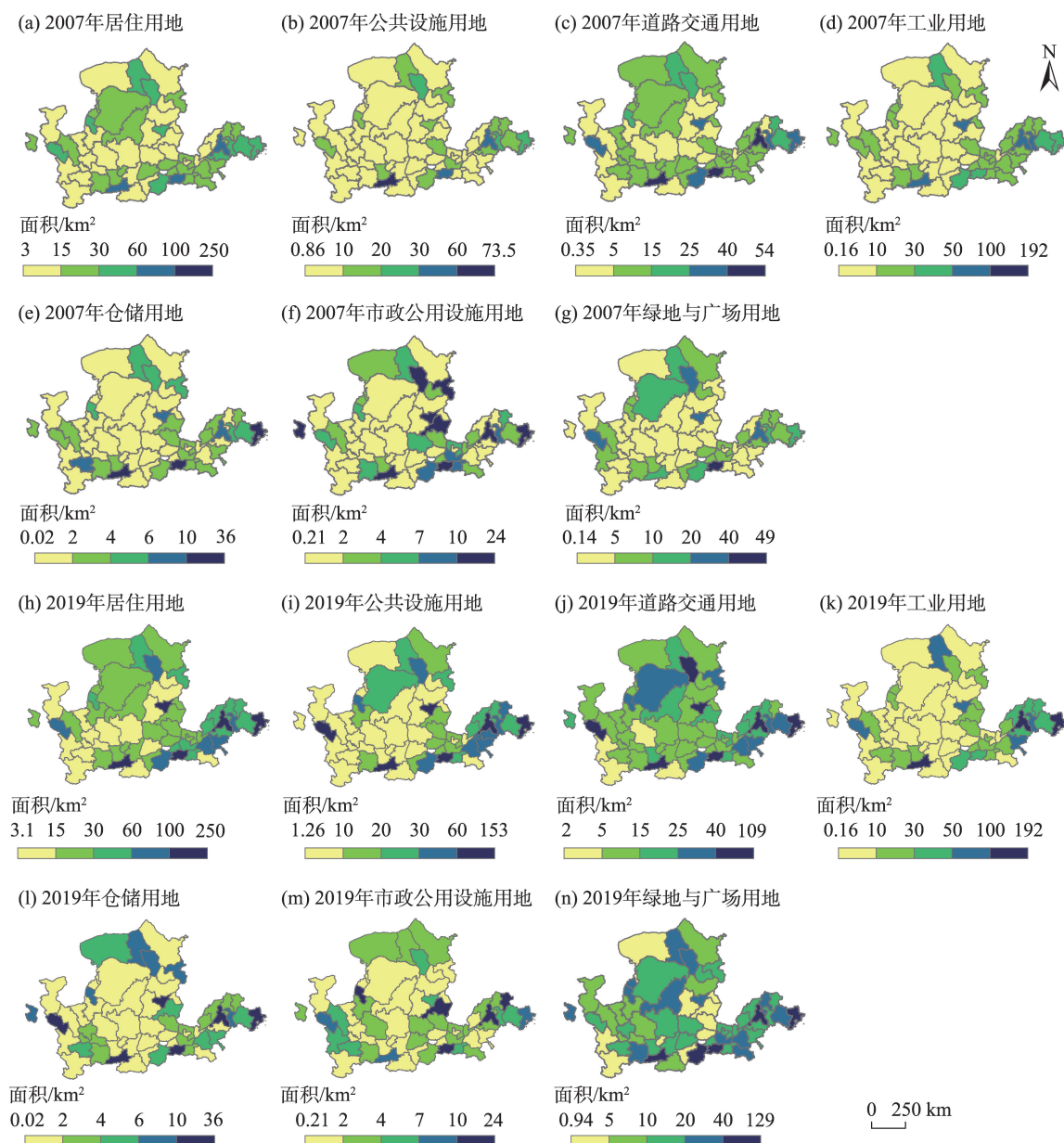


图3 2007—2019年黄河流域城市各类建设用地面积的时空变化

Fig.3 Spatial and temporal changes of urban construction land area in the Yellow River Basin during 2007–2019

积增幅超过100%。2007年和2019年,黄河流域城市工业用地面积均值分别为15.93 km²和23.55 km²,其中黄河下游地市和上中游省会城市工业用地规模较大,但工业用地效率较低和不合理布局问题仍然存在。市政公用设施用地和仓储用地面积的高值区在研究期内主要为省会及区域中心城市。2007年,黄河流域81.67%的地市绿地与广场用地面积低于10 km²。随着以人为本的新型城镇化深入推进,各地普遍重视城市绿色空间和公共空间建设。到2019年,仅有33.33%的地市绿地与广

场用地面积低于10 km²。整体而言,在经济社会快速发展的过程中,黄河流域省会及经济发达城市是各类建设用地配置的主要区域。

对黄河流域各城市建设用地结构信息熵的分析显示,2007年信息熵处于高值区的地市数量较多,主要为西安、郑州、济南与呼和浩特等省会城市及周边城市,而低值区主要是庆阳、延安、陇南等经济发展水平较差的黄土高原地区地市(图4)。各城市信息熵变异系数结果显示,城市间信息熵差异较大。伴随着经济社会的快速发展和城市建设的加

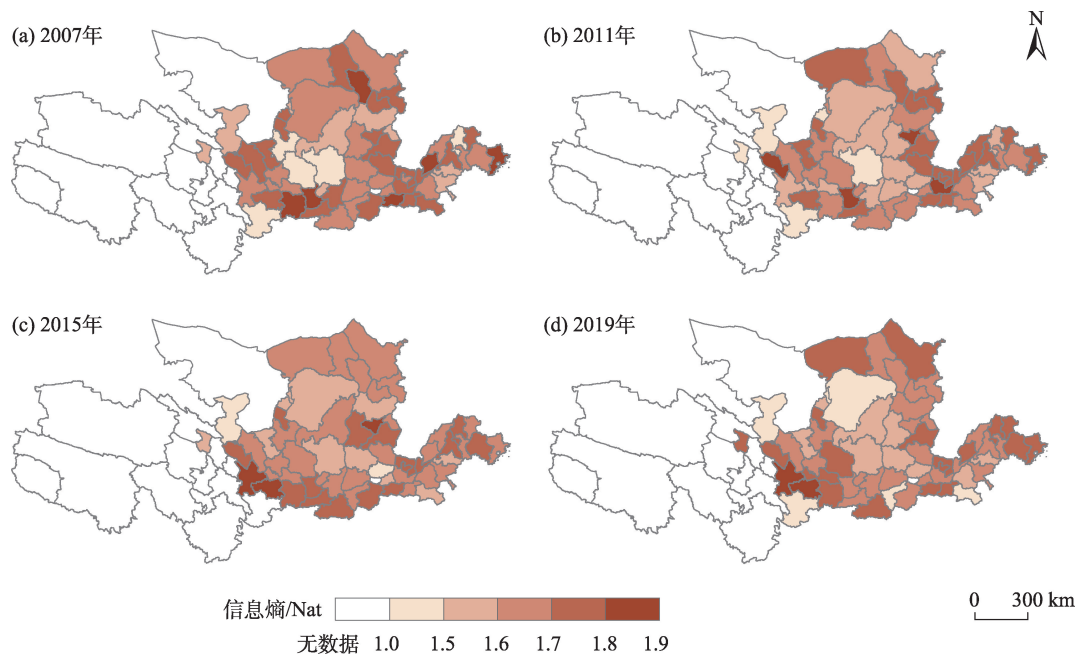


图4 2007—2019年黄河流域各城市信息熵时空格局

Fig.4 Spatial and temporal pattern of urban information entropy in the Yellow River Basin during 2007–2019

快,城市用地结构呈现出不同的演化特征。2011年,黄河流域城市建设用地结构信息熵变异系数增至0.0846,城市间用地结构的差异逐步加大。具体来看,西安等大城市居住用地和工业用地面积急剧增长,各类建设用地的规模差异拉大,导致均衡度有所下降,信息熵不断减小;而兰州、巴彦淖尔等城市各类建设用地规模差异缩小,用地结构均衡度有所上升,信息熵不断增大。到2015年,大部分地市公共设施用地和道路交通用地面积稳步增长,使得城市建设用地结构趋于均衡,信息熵不断增大。其中,定西市、石嘴山市、宝鸡市等地市建设用地结构信息熵增幅较大,普遍超过0.10 Nat,而晋城市、聊城市、新乡市等地市信息熵降幅超过0.15 Nat。到2019年,乌兰察布等城市建设用地结构成熟度不断提高,信息熵持续增大,为熵值高值地市;陇南市、武威市、西宁市等地市建设用地结构信息熵增幅超过0.20 Nat;三门峡市、太原市、咸阳市等地市建设用地信息熵降幅超过0.1 Nat,表明各地市城市建设用地演化空间分异明显,但城市间用地差异降低,变异系数从2015年的0.0817降至2019年的0.0591。整体而言,2007—2019年,黄河流域城市建设用地结构信息熵差异在波动中减小,省会城市及经济发达地市建设用地结构信息熵呈现出下降趋势,而欠发达地市在近15 a的快速扩张中信息熵逐步增大,表明城市建设用地配置日趋均衡。

2.3 黄河流域建设用地结构变化的驱动机制分析

2.3.1 影响因素重要性分析

为验证随机森林模型的可靠性,分别构建多元回归模型和随机森林回归模型来分析城市用地结构信息熵与各影响因子之间的关系,并验证其回归精度(图5)。结果表明,多元回归模型得出的估算值与真实值差距较大,回归方程的调整 R^2 仅为0.2197,平均绝对值误差(mean absolute error, MAE)为0.0821;随机森林模型估计结果的调整 R^2 为0.9557,MAE仅为0.0228。这表明随机森林模型具有更好的拟合优度和更小的拟合误差,适合进行影响因素重要性分析。

随机森林模型结果显示,IncMSE和IncNodePurity两种指标计算得到的影响因子重要性排序相差不大(图6)。城市用地规模、城市人口规模、产业结构升级、财政支出规模在2种测度方法中均排序前4且重要性依次递减,经济发展水平和政策支持力度对用地结构变化的影响较小。城市用地规模和城市人口规模是黄河流域城市建设用地结构演变最重要的驱动力,而经济发展水平和政策支持的影响有限。在快速工业化和城镇化过程中,大量乡村人口迁往城市,城市人口规模不断增大,对住宅、公共基础设施、道路交通改善等引致性需求急剧上升。在这种背景下,地方政府会加快城市内部建设和对外扩张步伐,驱动城市各类建设用地面

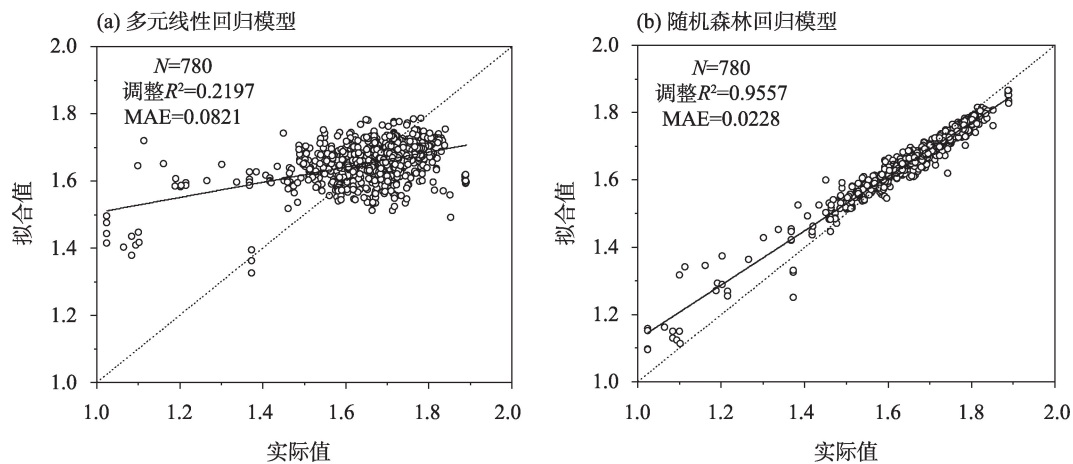


图5 多元线性回归模型与随机森林回归模型的拟合结果比较

Fig.5 Comparison of fitting results of multiple linear regression model and random forest regression model

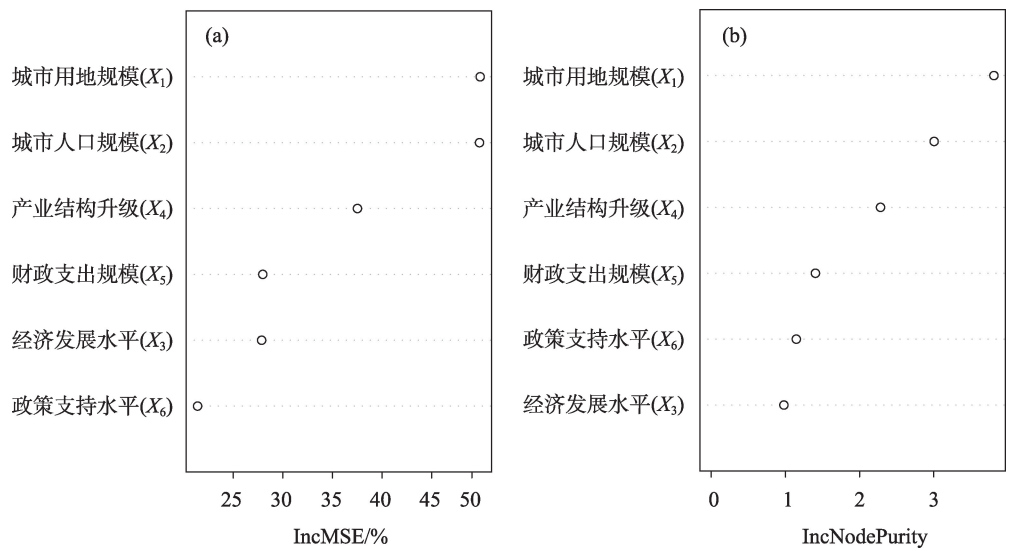


图6 影响因子的重要性排序

Fig.6 Importance ranking of influencing factors

积变化和城市用地结构的变迁。虽然产业结构升级是促进城市建设用地结构变化的内部驱动力,但由于只能间接反映产业用地的变化情况,与其他地类变动的关系较小,导致其重要性相对较低。财政支出规模的变化影响城市公共设施和道路交通的建设力度,进而作用于公共服务类用地规模和整个城市建设用地结构信息熵。职工年平均工资可在一定程度上反映城市居民的收入水平和生活水平,经济发展水平较高的地区其城市居民的消费能力也较强,居民对改善居住条件、出行条件,以及增加娱乐活动的需求增加,催生交通、娱乐设施等建设用地配套,间接影响城市内部生产、生活等地类的

规模。然而,由于传导链条较长且非直接影响,其重要性相对较低。政策支持力度反映了房地产投资与城市GDP的相对变动关系,支持力度越大表明房地产投资依存度越高,使得城市发展难以彻底摆脱传统的“土地财政”发展模式,面临着经济发展动力不足和活力较差、用地结构转换速率较低等挑战。

从各影响因子与城市用地结构信息熵的偏依赖图可以得出(图7),城市用地规模、城市人口规模、财政支出规模与城市用地结构信息熵呈正向变动关系,经济发展水平和产业结构升级与城市建设用地结构信息熵呈负向变动关系,政策支持力度则与城市建设用地结构信息熵呈现出“倒U”型变动关

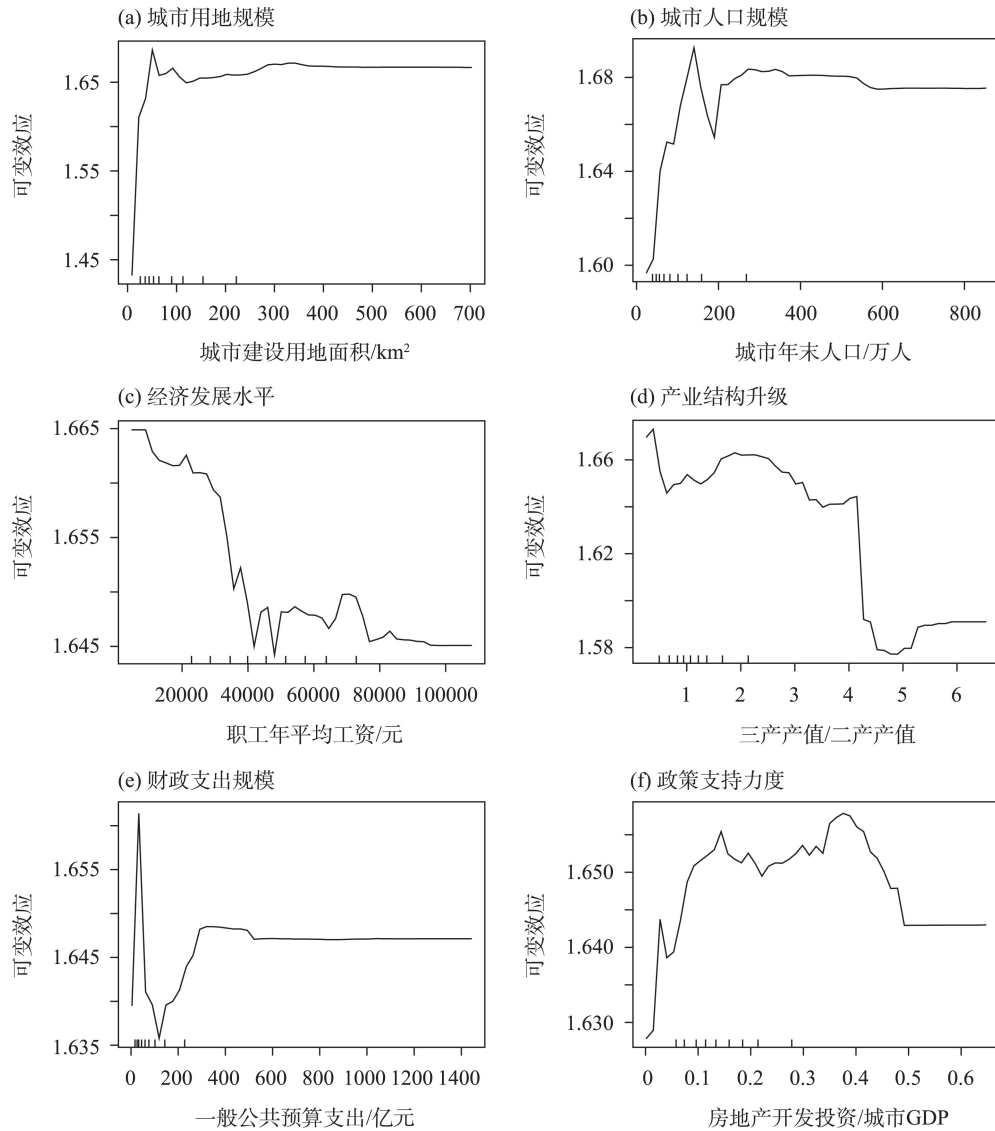


图7 影响因子对建设用地结构信息熵的偏依赖

Fig.7 Partial dependency for influencing factors on the entropy of construction land use structure information

系。具体来看,随着城市用地规模的增加,城市用地结构信息熵不断增大,城市内部各地类规模趋于均衡。当城市建设用地面积超过 100 km²后,用地规模对用地结构的作用达到最大并维持稳定。城市人口规模对用地结构的作用在城市人口为 145 万人时达到最大,之后迅速下降,在人口数为 200 万人时迅速加大并在之后保持稳定。随着经济发展水平的提高,城市用地结构信息熵不断降低,当职工年平均工资超过 4 万元时用地结构信息熵在低位保持相对稳定。产业结构升级与用地结构信息熵呈负向变化关系,在三产产值与二产产值的比值小于 4 时,用地结构信息熵在高位保持波动下降,但随着比值的增大,信息熵下降并在低位保持相对稳定。

当一般公共预算支出大于 100 亿元时,财政支出规模的对用地结构的作用快速增大,但在高于 300 亿元时保持相对稳定。当房地产开发投资额占城市 GDP 比重为 38% 时,政策支持力度对用地结构的作用达到最大;当低于 38% 时,政策支持力度与用地结构信息熵变动呈正相关关系;而当高于 38% 时,两者呈负相关关系,即城市用地信息熵会随着财政支持力度的增大而减小,加大城市用地的不均衡程度。

2.3.2 影响因素重要性的上中下游差异

以随机森林模型计算得到的 IncMSE 为指标分析各驱动因子对黄河流域及上中下游城市建设用地结构演变的重要性差异(表 3)。上游和中游各驱动因子重要性与整个流域的差异不大,城市用地规

表3 黄河各流域中影响因子的重要性排序

Tab.3 Ranking of the importance of influencing factors in different reaches of the Yellow River

| 区域 | 调整 R^2 | MAE | 排序1 | 排序2 | 排序3 | 排序4 | 排序5 | 排序6 |
|----|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 总体 | 0.9557 | 0.0228 | X_1 | X_2 | X_4 | X_5 | X_3 | X_6 |
| 上游 | 0.9606 | 0.0267 | X_1 | X_2 | X_4 | X_5 | X_3 | X_6 |
| 中游 | 0.9471 | 0.0193 | X_2 | X_1 | X_5 | X_4 | X_3 | X_6 |
| 下游 | 0.9443 | 0.0163 | X_2 | X_1 | X_3 | X_5 | X_6 | X_4 |

模和城市人口规模的重要性高于产业结构升级和财政支出规模,经济发展水平和政策支持力度的重要性最低。城市用地规模扩张直接影响各类城市建设用地配置,进而作用于城市用地结构信息熵。2007—2019年,黄河上游和中游城市建设用地规模共增长1826.77 km²,但居住、公共设施和道路交通用地的配置份额高达76.76%,是其余4类用地配置份额的3.3倍,这种差异化配置直接影响用地结构信息熵。随着城镇化进程不断推进,城市人口规模的增加促使地方政府扩大土地征收和土地出让规模,促进城市建设用地规模的扩张,进而影响城市建设用地结构信息熵。产业结构升级和财政支出规模分别通过影响产业类用地和公共基础设施类用地的变化作用于用地结构。2007—2019年,黄河上游和中游经济社会快速发展,社会消费品零售额和房地产开发投资年均增速保持在10%以上,助推了城市用地规模的快速扩张和用地结构的重组。下游驱动因子的重要性排序与上游和中游相差较大,城市人口规模和城市用地规模的重要性仍居于前2位,但后4位的排序变为经济发展水平>财政支出规模>政策支持力度>产业结构升级。相比于上游和中游,产业结构演替变为下游作用最小的因子,主要是由于下游城市发展水平普遍较高,二三产业产值的增加主要靠提升单位土地产出水平来实现。因此,相较于上游和中游地市,下游城市产业结构演变与隐含的产业用地变化之间的关系较弱,降低了产业结构升级对用地结构演化的解释力。

整体来看,不同流域城市用地结构演变的驱动因子中,城市用地规模和城市人口规模仍是重要性排序前2位的因子,充分表明建设用地面积和人口数量的变化会极大地影响城市的用地结构,其他指标的重要性排序在不同流域呈现出明显的差异性。

2.3.3 城市建设用地结构演化的驱动机制解析

城市建设用地系统是一个与外界进行广泛物质循环、能量传递和信息交流的耗散系统,其结构演化的实质就是城市用地系统内部运行所产生的“正

熵”和系统外部引入的“负熵”动态博弈的结果^[8]。在快速城镇化过程中,大量乡村人口转移到城镇地区,为城市扩张蔓延提供源源不断的动力。2007—2019年,研究区城市市辖区的年末人口增加了约2000万人,庞大的迁入人口推高了对各类建设用地的需求,但居住、基础设施、道路交通等用地需求优先级较高,影响各地类规模的相对变化及用地结构的调整。在城市扩张的过程中,新增建设用地上地类配置会影响整个城市建设用地结构的演变方向。数据分析结果表明,居住、公共设施、道路交通等用地在新增建设用地中占比较大,这种差异化配置在整体上的效果是降低了城市建设用地系统的有序度,推高城市建设用地结构信息熵。城市用地是城市产业发展的载体,产业转型升级会影响不同产业在土地竞争中优劣势的变化,侧面反映出产业用地的相对变动。随着工矿企业的外迁和商业服务业的稳步发展,城市内部结构完善和等级提升均有利于提高城市建设用地系统的有序度^[40],从而降低城市建设用地结构信息熵。这与匡兵等^[19]学者的结果相一致。在财政支出规模高速扩张的大背景下,城市内部道路交通基础设施不断完善、医院学校等公共设施配套也日渐完善,助力城市公共服务水平提高,成为城市建设用地结构信息熵上升的外部拉力^[18]。随着经济发展水平的提升,城市居民对美好生活的向往更加强烈,对改善居住和出行条件、优化绿色公共空间、增加娱乐活动等需求增加,从而刺激城市居住、交通以及娱乐设施等建设用地配置,影响城市生产生活类用地规模 and 建设用地结构信息熵。政策支持力度反映了房地产投资与城市GDP的相对变动关系。在一定范围内,随着政策支持力度的增大,居住用地和商服用地规模不断扩张,产生与城市用地规模扩张相似的效应;当超过一定阈值时,城市商品房住宅类用地配置的倾向性明显,用地结构转换速率较低,增加城市用地结构的不均衡程度和提高用地系统的有序度,降低城市用地结构信息熵(图8)。

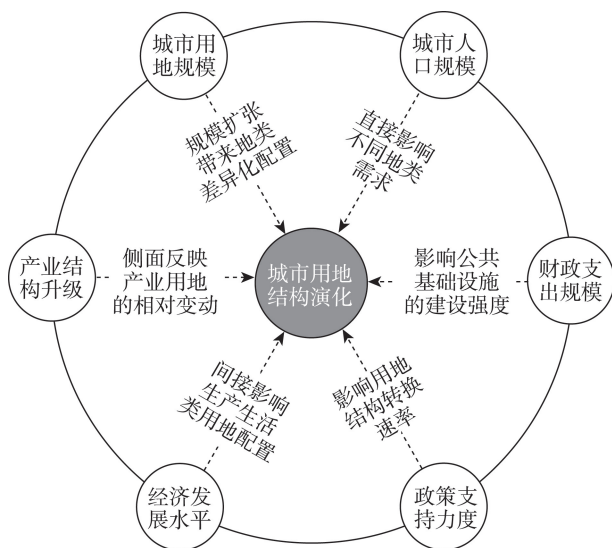


图8 城市建设用地结构演化的驱动机制

Fig.8 Driving mechanism of the change of urban construction land use structure

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 2007—2019年,黄河流域城市建设用地规模持续增长,年均增速达到5.34%;绿地与广场用地、公共设施用地、道路交通用地、居住用地面积年均增速超过研究区平均水平,而仓储用地、工业用地、市政公用设施用地面积的年均增速小于研究区平均水平。同期,黄河流域城市建设用地结构信息熵不断降低,从1.7778 Nat降至1.7337 Nat,经历了从“高位无序”到“低位有序”的变化过程。

(2) 2007—2019年,黄河上中下游城市建设用地规模增速依次加大,年均增速分别达到3.91%、5.06%和6.22%,城市建设用地结构从23%:34%:43%演变为19%:33%:48%。相应地,信息熵在波动中不断下降,其中中游城市用地结构信息熵下降最多,上游和下游城市的降幅相近。

(3) 在研究期内,黄河流域城市建设用地结构信息熵的变异系数从0.0773降为0.0591,表明城市间用地结构信息熵的差异波动减少。其中,省会城市及经济发达城市建设用地结构的信息熵存在降低趋势,用地均衡度有所降低,而欠发达城市的信息熵逐步增大,用地配置日趋均衡。

(4) 对整个黄河流域来说,城市建设用地规模和城市人口规模对城市用地结构演化的作用最强,而经济发展水平和政策支持力度的作用较小。分

流域结果表明,驱动因子对用地结构演变的作用存在异质性,中上游地区的分析结果与总体接近,而下游相差较大。

(5) 不同驱动因素对城市建设用地结构演化的作用方向存在差异。其中,城市用地规模、城市人口规模、财政支出规模与城市建设用地结构信息熵呈正向变动关系,经济发展水平、产业结构升级与城市建设用地结构信息熵呈反向变动关系,政策支持力度则呈现出“倒U”型的变动关系。

3.2 讨论

适度的城市建设用地规模和合理的城市用地结构是打造城市秀美生态空间、高效生产空间和宜居生活空间的重要基础,也是实现城市高质量发展的必由之路^[41-42]。结合黄河上中下游城市用地现状及国家宏观战略规划指引,充分发挥各驱动要素在城市建设用地结构演化中的“推”“拉”作用,可以助力城市用地精明增长和结构优化,服务城市高质量发展。城市用地规模和城市人口规模是影响最显著的2个因素,因此对整个黄河流域城市发展来说,要严格限制盲目扩张类开发建设,聚焦城市建成区内各地类重组和用地效率提升;同时,积极推进以人为本的新型城镇化,促进人口的集聚,优化城市发展格局,提升城镇化发展质量。除此以外,产业结构升级、财政支出规模、经济发展水平分别是上中下游地区最重要的驱动要素。因此,对上游来说,还需充分发挥生态和环境优势,优化配置各类产业用地,推进生态产业化和产业生态化,助力区域产业结构转型升级,实现生态保护与经济发展的互促共进。对中游来说,政府投资在城市建设用地结构演化中的作用依旧突出,在这一背景下,需要弱化政府对经济活动的干预,充分发挥其裁判员和服务员角色,同时积极健全市场机制以充分发挥市场在资源配置中的决定性作用,盘活各类用地需求和提高城市用地转换速率,提升城市发展的活力和竞争力。对下游来说,还需适应经济发展的新常态,依托良好的发展基础,积极推动经济增长方式转变,实现经济发展数量和质量的同步提升,进而辐射带动流域整体社会经济发展,成为黄河流域生态保护和高质量发展的引擎。

在黄河流域生态保护和高质量发展成为国家战略的大背景下,本文选择黄河流域开展城市建设用地结构的研究有助于支撑黄河战略的实施;另一方面,随着人工智能和机器学习的不断发展,本文

尝试将回归精度更高的随机森林模型应用于城市用地结构演化机理的研究,进而解析经济、社会、产业、政策等多维要素对城市建设用地结构演化的驱动机制,并分析了黄河上中下游驱动因素作用强度的异质性及传导路径,对于优化调控城市建设用地结构和促进城市高质量发展具有一定的现实价值。然而,由于本文主要使用的是城市用地的统计数据,无法精确定位各地类在城市内部的空间位置,未来需要进一步结合遥感等时序数据开展栅格尺度的城市用地情景模拟研究,形成精细的城市建设用地空间布局优化方案,进而高效配置城市建设用地,服务黄河流域生态保护和高质量发展战略的落实。

参考文献(References)

- [1] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析 [J]. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398. [Chen Mingxing, Lu Dadao, Zhang Hua. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 387-398.]
- [2] 高金龙, 包菁薇, 刘彦随, 等. 中国县域土地城镇化的区域差异及其影响因素 [J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2329-2344. [Gao Jinlong, Bao Jingwei, Liu Yansui, et al. Regional disparity and the influencing factors of land urbanization in China at the county level, 2000-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(12): 2329-2344.]
- [3] 国家统计局. 2021年中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 30-31. [National Bureau of Statistics. China statistical yearbook in 2021. Beijing, China: China Statistical Publishing House, 2021: 30-31.]
- [4] 朱英明, 姚士谋, 李玉见. 我国城市化进程中的城市空间演化研究 [J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(2): 12-16. [Zhu Yingming, Yao Shimou, Li Yujian. On the urban spatial evolution in the process of urbanization in China. *Geography and Territorial Research*, 2000, 16(2): 12-16.]
- [5] Ding C R, Zhao X S. Land market, land development and urban spatial structure in Beijing [J]. *Land Use Policy*, 2014, 40: 83-90.
- [6] 陈彦光, 刘明华. 城市土地利用结构的熵值定律 [J]. 人文地理, 2001, 16(4): 20-24. [Chen Yanguang, Liu Minghua. The basic laws of the Shannon entropy values of urban land-use composition. *Human Geography*, 2001, 16(4): 20-24.]
- [7] 谭永忠, 吴次芳. 区域土地利用结构的信息熵分异规律研究 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 112-117. [Tan Yongzhong, Wu Cifang. The laws of the information entropy values of land use composition. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 112-117.]
- [8] 王玉明, 王瑞康. 城市化时期郊区土地利用结构信息熵上升的原因 [J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1647-1657. [Wang Yuming, Wang Ruikang. Reasons for the increasing information entropy of suburban land use structure during the period of urbanization. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1647-1657.]
- [9] 陈彦光, 刘继生. 城市土地利用结构和形态的定量描述: 从信息熵到分数维 [J]. 地理研究, 2001, 20(2): 146-152. [Chen Yanguang, Liu Jisheng. An index of equilibrium of urban land-use structure and information dimension of urban form. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 146-152.]
- [10] 张恒义, 刘卫东, 石秋义. 基于偏移一份额法的区域建设用地结构变化和空间分布研究 [J]. 中国土地科学, 2010, 24(11): 63-68. [Zhang Hengyi, Liu Weidong, Shi Qiuyi. Research on regional structural changes and spatial distribution of construction land based on shift-share analysis. *China Land Science*, 2010, 24(11): 63-68.]
- [11] 卢新海, 葛堃, 柯善淦. 中国城市建设用地结构时空演变特征及机理研究 [J]. 经济问题探索, 2018(10): 25-32. [Lu Xinhai, Ge Kun, Ke Shangan. Research on space-time evolution features and mechanism of China's urban construction land structure. *Inquiry into Economic Issues*, 2018(10): 25-32.]
- [12] 吕涛, 郝泳涛, 王力生. 基于生态算法的城市建设用地结构优化 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 1130-1138. [Lv Tao, Hao Yongtao, Wang Lisheng. Structure optimization of urban development land based on ecological algorithm. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(7): 1130-1138.]
- [13] 孔雪松, 刘艳芳, 谭传凤. 嘉鱼县土地利用结构与效益变化的耦合效应分析 [J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1095-1101. [Kong Xuesong, Liu Yanfang, Tan Chuanfeng. Correlation analysis of the changes of land use structure and land use efficiency: A case study of Jiayu County in Hubei Province. *Resources Science*, 2009, 31(7): 1095-1101.]
- [14] 孙雁, 刘志强, 王秋兵, 等. 1910—2010年沈阳城市土地利用空间结构演变特征 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1204-1211. [Sun Yan, Liu Zhiqiang, Wang Qiubing, et al. Spatial structure evolution of urban land use in Shenyang during 1910-2010. *Progress in Geography*, 2012, 31(9): 1204-1211.]
- [15] Feng J, Chen Y G. Spatiotemporal evolution of urban form and land-use structure in Hangzhou, China: Evidence from fractals [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2010, 37(5): 838-856.

- [16] 陆汝成, 黄贤金, 李衡. 基于信息熵的建设用地演化和人文驱动分析: 以黑龙江省为例 [J]. 经济地理, 2009, 29(5): 827-831. [Lu Rucheng, Huang Xianjin, Li Heng. The evolution of construction land and analysis of human driving force based on information entropy: A case study of Heilongjiang Province. *Economic Geography*, 2009, 29(5): 827-831.]
- [17] 许芸鹭, 雷国平. 辽中南城市群城市用地结构的时空演变分析 [J]. 经济地理, 2018, 38(1): 69-77. [Xu Yunlu, Lei Guoping. Study on evolution of urban land structure in Liaozhongnan city groups. *Economic Geography*, 2018, 38(1): 69-77.]
- [18] 宋洋, 朱道林, Yeung Godfrey, 等. 收缩情境下城市用地结构时空格局演变及动力机制: 以中国东北地区为例 [J]. 地理研究, 2021, 40(5): 1387-1403. [Song Yang, Zhu Daolin, Yeung G, et al. Spatio-temporal evolution and driving mechanism of urban land use structure with the context of urban shrinkage: Evidence from Northeast China. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1387-1403.]
- [19] 匡兵, 卢新海, 周敏, 等. 武汉城市群城市用地结构时空演变特征及其机理 [J]. 经济地理, 2016, 36(5): 71-78. [Kuang Bing, Lu Xinhai, Zhou Min, et al. Spatio-temporal features of urban land structure change in Wuhan City group and underlying causes. *Economic Geography*, 2016, 36(5): 71-78.]
- [20] Li C X, Wu K N, Wu J Y. Urban land use change and its socio-economic driving forces in China: A case study in Beijing, Tianjin and Hebei region [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2018, 20(3): 1405-1419.
- [21] 谢汀, 刘爱宁, 高雪松, 等. 基于信息熵和灰色关联的成都市建设用地结构时空变化及驱动力分析 [J]. 农业现代化研究, 2015, 36(1): 118-125. [Xie Ting, Liu Aining, Gao Xuesong, et al. Temporal-spatial changes and driving forces of built-up land structure in Chengdu City based on information entropy and gray correlative degree analyses. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, 36(1): 118-125.]
- [22] 张雪茹, 姚亦锋, 孔少君, 等. 南京市2000—2014年城市建设用地变化及驱动因子研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 552-562. [Zhang Xueru, Yao Yifeng, Kong Shaojun, et al. The analysis on urban construction land change and driving forces in Nanjing from 2000 to 2014. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(4): 552-562.]
- [23] 曾刚, 胡森林. 百年未有之大变局下中国区域发展格局演变 [J]. 经济地理, 2021, 41(10): 42-48, 69. [Zeng Gang, Hu Senlin. Spatial evolution process of China's regional development pattern in big changes unseen in a century. *Economic Geography*, 2021, 41(10): 42-48, 69.]
- [24] Tuan Y F. Geography, phenomenology, and the study of human nature [J]. *The Canadian Geographer*, 1971, 15(3): 181-192.
- [25] 龙花楼, 屠爽爽. 土地利用转型与乡村振兴 [J]. 中国土地科学, 2018, 32(7): 1-6. [Long Hualou, Tu Shuangshuang. Land use transition and rural vitalization. *China Land Science*, 2018, 32(7): 1-6.]
- [26] 邓祥征, 杨开忠, 单菁菁, 等. 黄河流域城市群与产业转型发展 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 273-289. [Deng Xiangzheng, Yang Kaizhong, Shan Jingjing, et al. Urban agglomeration and industrial transformation and development in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 273-289.]
- [27] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展 [J]. 经济地理, 2020, 40(6): 1-8. [Fang Chuanglin. Spatial organization pattern and high-quality development of urban agglomeration in the Yellow River Basin. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 1-8.]
- [28] 徐维祥, 徐志雄, 刘程军. 黄河流域地级城市土地集约利用效率与生态福利绩效的耦合性分析 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 114-130. [Xu Weixiang, Xu Zhixiong, Liu Chengjun. Coupling analysis of land intensive use efficiency and ecological well-being performance of cities in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 114-130.]
- [29] 童绍玉, 蔡运龙, 李双成. 云南省楚雄市与双柏县土地利用变化对比研究 [J]. 地理研究, 2006, 25(3): 397-405, 563. [Tong Shaoyu, Cai Yunlong, Li Shuangcheng. The comparative analysis of land use change between Chuxiong and Shuangbai in Yunnan Province. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 397-405, 563.]
- [30] 陈彦光. 中国城市发展的自组织特征与判据: 为什么说所有城市都是自组织的? [J]. 城市规划, 2006, 30(8): 24-30. [Chen Yanguang. Self-organized characteristics and criteria of the development of Chinese cities. *City Planning Review*, 2006, 30(8): 24-30.]
- [31] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [32] 陈凯, 刘凯, 柳林, 等. 基于随机森林的元胞自动机城市扩展模拟: 以佛山市为例 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 937-946. [Chen Kai, Liu Kai, Liu Lin, et al. Urban expansion simulation by random-forest-based cellular automata: A case study of Foshan City. *Progress in Geography*, 2015, 34(8): 937-946.]
- [33] 赵艳艳, 张晓平, 陈明星, 等. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析 [J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2814-2829. [Zhao Yanyan, Zhang Xiaoping, Chen Mingxing,

- et al. Regional variation of urban air quality in China and its dominant factors. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2814-2829.]
- [34] 张琨, 李斌, 阳文静, 等. 基于时序遥感的庐山自然保护区植被分类及其变化分析 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(4): 703-712. [Zhang Li, Li Bin, Yang Wenjing, et al. Forest vegetation classification and its variation in Lushan Nature Reserve using Proba-V vegetation products. *Progress in Geography*, 2021, 40(4): 703-712.]
- [35] 崔继昌, 郭贯成. 省际交界地区城市用地结构时空演变及影响因素: 基于信息熵视角的分析 [J]. 城市问题, 2022, 41(3): 33-42, 65. [Cui Jichang, Guo Guancheng. Research on spatio-temporal evolution of urban land use structure in interprovincial border areas and the influencing factors: Based on information entropy theory. *Urban Problems*, 2022, 41(3): 33-42, 65.]
- [36] 叶强, 莫正玺, 许乙青. 1979—2014年长沙市城市功能用地扩展与驱动力研究 [J]. 地理研究, 2019, 38(5): 1063-1079. [Ye Qiang, Mo Zhengxi, Xu Yiqing. The expansion and driving forces of the functional space land: A case study of Changsha from 1979 to 2014. *Geographical Research*, 2019, 38(5): 1063-1079.]
- [37] 刘奎, 王健. 土地经营对中国城市空间扩张的驱动机制: 基于273个地级市的实证分析 [J]. 资源科学, 2021, 43(4): 764-775. [Liu Kui, Wang Jian. Driving mechanism of land conduct on urban spatial expansion in China: Empirical analysis based on 273 prefecture-level cities. *Resources Science*, 2021, 43(4): 764-775.]
- [38] 李咪, 王成新, 姬宇, 等. 山东半岛城市群建设用地结构的时空特征及变化机理研究 [J]. 世界地理研究, 2018, 27(4): 108-117. [Li Mi, Wang Chengxin, Ji Yu, et al. Spatio-temporal characteristics and changing mechanism of construction land structure in Shandong Peninsula Urban Agglomerations. *World Regional Studies*, 2018, 27(4): 108-117.]
- [39] 高金龙, 陈雯. 转型期中国城市用地结构动态演变及其机理: 基于长三角51个样本城市的实证研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 540-551. [Gao Jinlong, Chen Wen. Dynamic evolution and its driving mechanism of urban land use restructuring within the transition context: Case study of 51 sample cities in the Yangtze River Delta. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(4): 540-551.]
- [40] 王玉明. 地理环境演化趋势的熵变化分析 [J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1508-1517. [Wang Yuming. The analysis of entropy changes on the evolutionary tendency of geographical environment. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1508-1517.]
- [41] 方创琳, 李广东, 张蕾. 中国城市建设用地的动态变化态势与调控 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 363-376. [Fang Chuanglin, Li Guangdong, Zhang Qiang. The variation characteristics and control measures of the urban construction land in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 363-376.]
- [42] 谭荣辉, 刘耀林, 刘艳芳, 等. 城市增长边界研究进展: 理论模型、划定方法与实效评价 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 327-338. [Tan Ronghui, Liu Yaolin, Liu Yanfang, et al. A literature review of urban growth boundary: Theory, modeling, and effectiveness evaluation. *Progress in Geography*, 2020, 39(2): 327-338.]

Spatiotemporal changes of urban construction land structure and driving mechanism in the Yellow River Basin based on random forest model

GUO Yuanzhi¹, LI Xuhong^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Cities are the main spatial carriers for the agglomeration of regional population, industry and other factors, and systematically revealing the evolution of urban construction land structure and its driving mechanism is of great significance for further promoting the implementation of ecological conservation and high-quality development strategy of the Yellow River Basin. Based on the urban construction land data of the Yellow River Basin from 2007 to 2019, the spatiotemporal change characteristics and differentiation patterns of the construction land structure in the basin were analyzed by using the information entropy model, and the formation mechanism of the driving factors was examined by using the random forest model. The results show that: 1) From 2007 to 2019, the area of urban construction land in the Yellow River Basin continued to grow, with an average annual growth rate of 5.34%, but the information entropy of urban construction land structure decreased, and experienced a change process of high-level disorder, relatively stable, and low-level orderly. 2) The growth rate of urban construction land use in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River increased successively, with the annual growth rate reaching 3.91%, 5.06% and 6.22% respectively. The information entropy of urban construction land use structure in the middle reaches of the Yellow River decreased the most, and the decline rates in the upper reaches and lower reaches were similar. 3) All types of construction land in the basin are mainly distributed in provincial capitals and cities in economically developed areas, and there is a clear spatial heterogeneity in the information entropy of urban construction land use structure in the region. The information entropy of urban construction land use structure in provincial capital cities and economically developed cities showed a decreasing trend, while the information entropy of less developed cities gradually increased. 4) The scale of urban land use and the size of urban population have the strongest effect on the change of urban construction land use structure, followed by the intensity of industrial structure upgrading and scale of fiscal expenditure. The role of economic development level and policy support is small, and the intensity of impact of upstream, middle reaches, and downstream influencing factors is heterogeneous. 5) The scale of urban land use, the size of urban population, and the scale of fiscal expenditure showed a positive change relationship with the information entropy of urban construction land use structure, the level of economic development and industrial structure upgrading showed a negative change relationship with the information entropy of urban construction land use structure, and the policy support showed an inverted U-shaped change relationship with the information entropy of urban construction land use structure.

Keywords: urban construction land; information entropy; random forest model; high-quality development; Yellow River Basin