doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.08.016

基于时序过程的沿黄粮食主产区土地利用分异研究

杨崇科[1,2]　马泉来[1,2]　周　浩[3]　万小强[1,2]　曹艳杰[1,2]

(1.河南省资源环境调查一院,郑州 450007;
2.河南省自然资源科技创新中心(资源环境承载能力评价与监测预警研究),郑州 450007;
3.湖南师范大学地理科学学院,长沙 410081)

摘要:探查粮食主产区土地利用变化规律,能够发现土地利用行为异常、实现粮食生产优化配置,但相关研究在时空过程解析上重格局轻过程、重模拟轻度量,定量分析仍显不足。本文基于多期土地利用序列数据等,从时序过程视角构建累积动态度模型,并采用时空栅格建模、空间点模式分析等方法,定量揭示 1980 年以来河南省沿黄粮食主产区土地利用变化过程特征,深化土地利用变化内在规律挖掘和多维表达研究。结果表明:1980—2020 年,河南省沿黄的原阳县、封丘县等 6 县以耕地利用为主且面积占比均超过 79%,城镇建设用地剧烈扩张而农村居民点面积增长平缓,城乡二元化发展显著,水域、林地受国家政策调控影响较大,面积波动变化。变化时序过程受距离线性要素(黄河和主干道路)远近的影响较大,但影响类型和范围存在差异。距离较近范围的累积变化类型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ均处于聚集状态,且随着缓冲区扩大,类型Ⅰ的聚集程度先增后减,类型Ⅱ、Ⅲ则持续减弱。变化时序过程的空间尺度性效应显著。累积变化强烈的地区受空间尺度影响较小,空间尺度 1 km 下各类型均处于离散状态,但随着空间尺度增加,聚集性逐渐提高,并至 9 km 处达到极值。土地利用累积动态度能较好揭示长时间序列土地利用变化的过程性规律,为加强对当地土地利用变化认知、促进土地资源优化配置提供理论支撑。

关键词:土地利用变化;遥感;累积动态度;时序过程;粮食生产

中图分类号:F323.211　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)08-0171-09　　**OSID**:

Land Use Differentiation in Typical Main Grain Producing Areas along Yellow River Based on Time Series Processes

YANG Chongke[1,2]　MA Quanlai[1,2]　ZHOU Hao[3]　WAN Xiaoqiang[1,2]　CAO Yanjie[1,2]

(1. *The First Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province*, *Zhengzhou* 450007, *China*
2. *Science and Technology Innovation Centre of Nature Resources of Henan Provinces* (*Evaluation Monitoring and Early Warning of Resource Environmental Bearing Capacity*), *Zhengzhou* 450007, *China*
3. *School of Geographic Sciences*, *Hunan Normal University*, *Changsha* 410081, *China*)

Abstract: By exploring the laws of land use changes in the main grain producing areas, the abnormal land use behaviors can be identified and the allocation of grain production can be optimized. However, current research primarily focuses on patterns rather than processes, and simulations rather than quantitative analyses, resulting in insufficient data. Multi-period land use sequence data was used to quantitatively reveal the characteristics of land use change processes in the main grain producing areas along the Yellow River in Henan Province since 1980. Time-series processes, time-space grid modeling, cumulative dynamic degree models, spatial point pattern analyses, and other methods were employed to deepen understanding of the internal laws and multi-dimensional expressions of land use change. The results showed that since 1980, there was significant temporal and spatial heterogeneity in land use along the Yellow River. The area of cultivated land was decreased slowly, urban construction land was expanded, rural residential areas were grown slowly, the land for water areas was firstly decreased and

收稿日期:2022-12-20　修回日期:2023-02-27

基金项目:河南省重点研发与推广专项(222102320299)、湖南省自然科学基金项目(2021JJ40352)和湖南省教育厅创新平台科研项目(20K080)

作者简介:杨崇科(1988—),男,高级工程师,主要从事资源环境效应及优化配置研究,E-mail:15290851067@163.com

通信作者:周浩(1990—),男,讲师,博士,主要从事耕地及国土资源综合利用研究,E-mail:zhouhao7404@163.com

then increased, and the forest land was increased first and then decreased. The land development activities along the Yellow River and around the county built-up areas were intensified and become more frequent. The time sequence process was greatly affected by the distance from roads and rivers, but the impact types and scope were different. The land dynamic change types Ⅰ, Ⅱ, and Ⅲ, located close to the linear elements, were in the aggregation distribution state. With the expansion of the buffer zone, the aggregation degree of type Ⅰ was firstly increased and then decreased, while types Ⅱ and Ⅲ continued to be weaken. The temporal process was greatly affected by the spatial scale. The stronger the change was, the weaker the influence of the spatial scale was. All types were in a discrete state at 1 km spatial scale, but the aggregation was increased gradually with the increase of spatial scale. The time-series process research method based on cumulative dynamic degree could better reveal the information of long-time series land use change, thus deepening the understanding of land use changes.

Key words: land use changes; remote sensing; cumulative dynamic degree; sequential process; grain production

0 引言

探查特定地区土地利用变化规律,能够发现土地利用行为异常、实现土地资源优化配置[1]。自 21 世纪初以来,我国城镇化和工业化进程持续推进,土地利用变化表现为传统用地类型减少、景观同质化显著等特点[2-3]。其中,对于主要粮食产区而言,由于粮食生产与经济建设的客观矛盾,土地利用变化不仅表现更为突出的建设占用耕地、林草地退化等空间维度差异,而且在全域时序过程上也呈现高度复杂性[4-6]。因此,有必要围绕该类型区开展土地利用变化的内在规律挖掘和多维表达研究,以促进土地资源优化配置和保障粮食安全。

作为全球变化研究的组成部分和重要动因,面向粮食生产需求的土地利用变化研究已引起了学者高度关注。当前,相关研究主要集中在经济发达区或生态脆弱区,多围绕土地利用变化的“形”(空间形态)、“量”(类型与数量)和“理”(演化机理)等,采用如结构比例、转移矩阵、土地利用动态度、热点分析、地统计学分析等模型来简化土地利用过程,分析其基本模式、数量结构和空间格局,为深化土地利用变化研究提供了基础。如宋戈等[7]引入空间形态学中的标准差椭圆,来研究三江平原耕地利用变化的方向性特征;周浩等[8]通过动态度指数来研究挠力河流域相邻年份间土地利用变化剧烈程度;宋小青等[9]采用转移矩阵来描述耕地在不同时间节点上的数量转型特征;丁智强等[10]运用信息图谱论揭示了云南哈尼梯田长时间序列的土地利用时空变化特征及其地形梯度效应。但上述研究多侧重于研究对象整体或内部结构单元的状态特征描述(如结构比例、动态度指数等指标仅描述了研究对象的整体变化速率,无法细致度量单位内部的异质性),在时空过程解析上重格局轻过程、重模拟轻度量,定量分析仍显不足。同时有研究发现,通过定量表达多时空条件下土地利用的“空间格局”和“时序特征”,对土地利用变化过程进行量化,有利于进一步深化土地利用变化研究[11-12]。因此,从时序过程视角出发,对土地利用变化的时空过程进行度量,能够探查土地利用状态分析中难以发现的差异,从而揭示时空过程潜在规律,以深化土地利用变化研究。

黄河中游沿岸作为我国传统农区和新时期高质量发展战略区,在推动国家生态文明建设及商品粮供应安全上具有重要作用[13-15]。长期以来,经济发展建设及持续性生态退耕政策等综合作用,导致该地区土地利用变化显著且时序过程趋于复杂。基于此,本文以位于黄河中游沿岸的河南 6 县(以下简称“沿黄 6 县”)为研究区,从时序过程视角构建累积动态度模型以拓展土地利用变化研究思路,并采用时空栅格建模、空间点模式分析等方法,定量揭示 1980—2020 年该地区土地利用变化过程特征,挖掘潜在分布模式,以加强对当地土地利用配置的认知,为促进土地资源优化配置提供理论支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

沿黄 6 县位于黄河中部的干流北岸、河南省境内,辖原阳县、封丘县、延津县、长垣县、滑县和濮阳县 6 个县级行政区(图 1),总面积 7 657.15 km^2。地势以平原为主,属温带大陆性季风气候区,四季分明,但降水年际和区域分布不均,易形成季节性干旱。该地的农业开发利用条件较为优越,农业生产空间占国土总面积的近 80%,并已成为河南省乃至我国最重要的粮食主产区之一。根据第七次人口普查数据,2020 年其常住人口已达到 473.37 万人,对应 GDP 为 1 739.94 亿元,土地利用及开发程度较高,受人类活动干扰强烈。因此,在相对较小的时空尺度,该地区富集了本文所需的自然、经济、政策等信息,具有显著的地域特色和代表性。

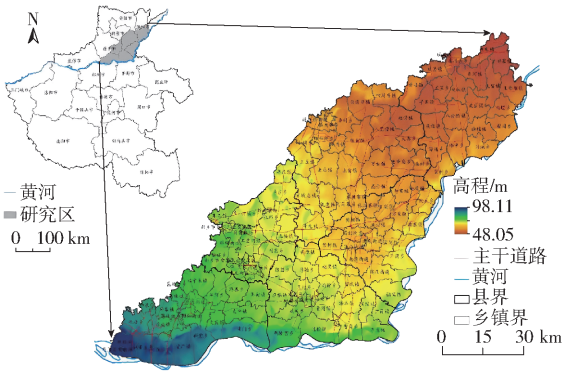

图 1　研究区地理位置示意图

Fig. 1　Location of research areas

1.2　数据来源

土地利用原始信息源均来自美国陆地资源卫星 Landsat 多光谱遥感影像，数据获取自美国地质勘探局（USGS）（http：// earthexplorer. usgs. gov/），过程中选用不同的卫星数字产品，在影像的几何纠正、图像增强等预处理基础上，采用不同波段的标准假彩色融合以实现人机交互式目视解译，并结合后期的室内数据纠正，完成 1980、1990、2000、2010、2020 年共 5 期土地利用信息识别，具体划分类型包括耕地（包括旱地和水田）、林地、草地、水域、建设用地（城镇建设用地、农村居民点和其他建设用地）和未利用地 6 大类；解译精度验证方面，由于早期（1980 年和 1990 年）图件数据等资料较少，主要通过比对中国科学院资源环境科学数据中心（http：// www. resdc. cn）“中国土地利用现状遥感监测数据”（30 m）以及历史文本资料进行，中期（2000 年和 2010 年）则通过 Google Earth 软件布控数据的采样网格验证点来实现（解译准确率均大于 85%），而对于现状年（2020 年）的验证，通过对实地 GPS 信息样点的比对验证和记录（考察时间为 2020 年 8 月 7—13 日），完成土地利用解译数据的精度验证（解译准确率 89. 20%）；基础地理信息数据包括行政区划数据（县级和乡镇级）、黄河水系分布以及基础道路交通数据，均来自于当地自然资源管理部门。研究中各图件经投影变换统一转为 Albers 双标准纬线等积投影。

2　研究方法

通过栅格化处理相邻年期的土地利用变化过程，以揭示土地动态演化在空间维度上的异质性规律，继而通过累加研究期不同时段的空间过程，实现土地利用变化的时序过程探查。

2.1　土地利用动态度

2.1.1　动态度计算

动态度客观描述了土地利用变化状态的总体特征，其中单一动态度 D 为某地类在研究期的面积变化速率，综合动态度 C 则为所有地类在研究期的整体面积变化快慢情况[8]，计算公式为

$$D = \frac{1}{T}(U_b - U_a)/U_a \times 100\% \tag{1}$$

$$C = \frac{1}{T}\left[\sum_{i=1}^{n} \Delta C_{Ui-j} \Big/ \left(2\sum_{i=1}^{n} C_{Ui}\right)\right] \times 100\% \tag{2}$$

式中　U_a——对应地类在研究初期面积，km^2

U_b——该地类在研究末期面积，km^2

T——研究时段长度，a

C_{Ui}——研究初期 i 种地类面积，km^2

ΔC_{Ui-j}——i 种地类变为 j 种地类面积，km^2

2.1.2　动态度栅格化处理

由于动态度无法细致度量土地利用变化的内部空间过程，因此借鉴景观生态学中能反映景观格局特征的网格采样法，并考虑平均斑块面积（平均斑块面积的 2 ~ 5 倍能较好地反映采样区周围景观格局的异质性特征[16]），确定网格采样尺寸为 2 km × 2 km（研究区边缘的不规则地块，面积大于 0. 5 个规则网格的单独作为一个样区，面积小于 0. 5 个规则网格的并入相邻的样区，最终共有样区 2 100 个），来网格采样 C；继而将对应网格的 C 视作该网格中心点值，并运用克里金插值法（Kriging），实现沿黄 6 县综合动态度的栅格化处理（分辨率为 30 m）。

2.2　CDDLU 模型构建

为实现土地利用变化的三维时空过程向二维平面压缩，对所有相邻时段动态度差值的绝对值进行求和处理，即可获得土地利用累积动态度（Cumulative dynamic degree of land use，CDDLU），以深化土地利用变化研究。CDDLU 反映不同时序过程所对应的土地利用变化快慢程度，CDDLU 越大则土地利用变化时序过程越强烈，采用 K-means 聚类法对 CDDLU 进行等级类型评价，以保证每一类型的差异最小，进而挖掘土地利用变化的时序过程模式。公式为

$$CDDLU = \sum |C_t - C_{t+1}| \tag{3}$$

式中　t——年份时点由小到大的序列数，本文 1980、1990、2000、2010、2020 年的 t 值依次为 1、2、3、4、5

C_t——对应年份时点栅格化处理后的综合动态度

2.3　时序过程模式探索方法

研究区属黄河干流北岸豫北平原的核心粮食主产区，农业生产空间规模大，其境内黄河以及国省道、高速公路、铁路等基础道路地理要素对该地区土地利用格局形成影响显著，因此本文选取黄河以及

主干道路等线性地理要素,来分析土地利用变化时序过程模式的近邻缓冲尺度效应。同时,在具体模式效应探索过程中,空间点模式分析中的最近邻指数(NNI)[12]通过计算最邻近点对应的平均距离,来比较该点的观测模式与随机模式之间的相似性,进而判定点的分布模式状态,在空间尺度分析上具有较好的探索性和应用性。因此,本文选取该指数来研究单一空间尺度下不同土地利用变化类型的临近缓冲特征,公式为

$$NNI = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{n} \Big/ \frac{1}{\sqrt{\frac{n}{A}}} \tag{4}$$

式中 d_i——第 i 个网格与其最近邻网格之间距离,取 1、2、3、5、10 km

n——动态度网格采样数目

A——研究区面积

$NNI=1$,类型点处于随机分布状态;$NNI<1$,类型点处于集聚分布状态;$NNI>1$,对应类型点处于均匀分布状态。为了更好地反映实测平均距离和预期平均距离偏离程度,用正态分布检验得出 Z 值及其置信水平,Z 值为负值且越小,则要素分布越趋于集聚分布;Z 值为正值且越大,则要素显著偏向均匀分布;位于二者间则随机分布。

由于点分布模式的空间尺度性效应,使得点在不同缓冲距离上,其所表现的聚类效果存在差异,因此,采用多距离空间聚类的 Ripley's k 指数法[17],通过比较某一空间尺度的观测 K 值和期望 K 值的相对大小确定类型点的分布模式,来描述多空间尺度所对应的土地利用变化时序过程特征,以最大限度挖掘空间点信息,公式为

$$K(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} I_r(u_{ij}) \quad (i \neq j) \tag{5}$$

其中

$$I_r(u_{ij}) = \begin{cases} 1 & (u_{ij} \leqslant r) \\ 0 & (u_{ij} > r) \end{cases} \tag{6}$$

式中 r——空间尺度

u_{ij}——点 i 和点 j 之间的距离

为了更好地解释实际空间格局,提出了 L 函数代替 K 函数,由此可得

$$L(d) = \sqrt{\frac{A \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} K_{i,j}}{\pi n(n-1)}} \tag{7}$$

式中 d——距离

$K_{i,j}$——权重,如果没有边校正,当 i 和 j 之间的距离小于 d 时,$K_{i,j}=1$,反之 $K_{i,j}=0$

在 $L(d)$ 变换下,预期值 K 等于距离。当处于置信区间内,如果特定空间尺度的 K 观测值大于 K 预期值,则该类型点分布的聚类程度更高;如果 K 观测值小于 K 预期值,类型点分布的离散程度更高。

3 结果与分析

3.1 1980 年以来沿黄 6 县土地利用现状

利用 ArcGIS 10.5 对 1980 年以来土地利用现状数据进行汇总统计。由表 1 和图 2 可知,40 年来,沿黄 6 县土地利用结构以旱地、水田、建设用地和水域用地为主,林地、草地以及未利用地面积占比较低,土地利用发生了明显变化。其中,建设用地面积持续增加,且尤以城镇建设用地最为迅速,空间上主要集中于长垣县、延津县、原阳县等建成区周边地带。水田、旱地和林地面积均呈先增加后减少特点,草地、水域用地和未利用地面积持续减少,主要是由于中期黄河沿岸耕地后备资源的持续性开发至殆尽以及经济快速发展导致。具体表现为:

(1)长期以来,作为粮食主产区的沿黄 6 县,耕地保护目标战略执行较好,整体数量格局稳定,其二级类的旱地、水田面积占比分别由 1980 年的 73.29%、6.50%变为 2020 年的 73.10%、6.30%;同时,沿黄 6 县属河南省农业人口相对稠密区,境内城市化、工业化进程持续推进,以及郑州市、上海市等发达城市对该地区的人口虹吸作用,使得其城乡发展呈显著的"二元化"特点,并表现在建设用地内部结构变化差异上。40 年间,该地区建设用地中城镇建设用地扩张显著,其面积占比由 1980 年的 0.42%上升至 2020 年的 2.29%,与之对应的是农村居民点面积占比仅增加 0.15 个百分点,二者相对面积扩张比达到 5.33∶1;对于生态性用地而言,林地和水域用地面积波动变化,其中林地面积先增后减,而水域用地自 2000 年来受当地退耕还湿等政策影响,研究期内面积先减后增,草地面积占比由 1980 年的 0.17%降至 2020 年的 0.07%,未利用地则由 1980 年的 0.82%变为 0.02%。

(2)从动态度来看,各时段的土地利用变化状态存在较大差异。1980—2020 年,沿黄 6 县水田和旱地面积缓慢下降,动态度分别为 -0.08%和 -0.01%,面积下降时段主要集中在 2000 年后;建设用地中城镇建设用地的动态度为所有地类最高(10.97%),其他建设用地为 4.90%,二者均表现出快速扩张的特点,而农村居民点面积呈增加—减少—增加态势,平均动态度仅为 0.03%;草地面积持续下降且尤以 2000—2010 年最为突出,年均变化率达到 -4.72%,水域用地先减后增,未利用地先增后减,二者平均动态度分别为 -0.64%和 -2.44%。

表 1　1980—2020 年各土地利用类型面积和动态度

Tab. 1　Statistics on area and dynamics of various land use types from 1980 to 2020

项目	水田	旱地	林地	草地	水域用地	城镇建设用地	农村居民点	其他建设用地	未利用地
1980 年面积/km^2	497. 93	5 611. 76	51. 00	12. 94	365. 76	32. 52	994. 70	26. 96	62. 93
1990 年面积/km^2	495. 29	5 588. 27	57. 09	12. 91	359. 87	38. 16	997. 60	28. 37	78. 92
2000 年面积/km^2	505. 18	5 735. 70	65. 56	11. 69	221. 38	60. 01	994. 16	32. 77	30. 05
2010 年面积/km^2	501. 94	5 712. 52	44. 83	6. 17	255. 99	118. 70	967. 05	42. 71	6. 58
2020 年面积/km^2	482. 39	5 596. 62	37. 38	5. 08	272. 23	175. 23	1 006. 25	79. 85	1. 46
1980 年面积占比/%	6. 50	73. 29	0. 67	0. 17	4. 78	0. 42	12. 99	0. 35	0. 82
2020 年面积占比/%	6. 30	73. 10	0. 49	0. 07	3. 56	2. 29	13. 14	1. 04	0. 02
1980—1990 年动态度/%	－0. 05	－0. 04	1. 19	－0. 02	－0. 16	1. 73	0. 03	0. 52	2. 54
1990—2000 年动态度/%	0. 20	0. 26	1. 48	－0. 95	－3. 85	5. 73	－0. 03	1. 55	－6. 19
2000—2010 年动态度/%	－0. 06	－0. 04	－3. 16	－4. 72	1. 56	9. 78	－0. 27	3. 03	－7. 81
2010—2020 年动态度/%	－0. 39	－0. 20	－1. 66	－1. 76	0. 63	4. 76	0. 41	8. 70	－7. 79
1980—2020 年动态度/%	－0. 08	－0. 01	－0. 67	－1. 52	－0. 64	10. 97	0. 03	4. 90	－2. 44

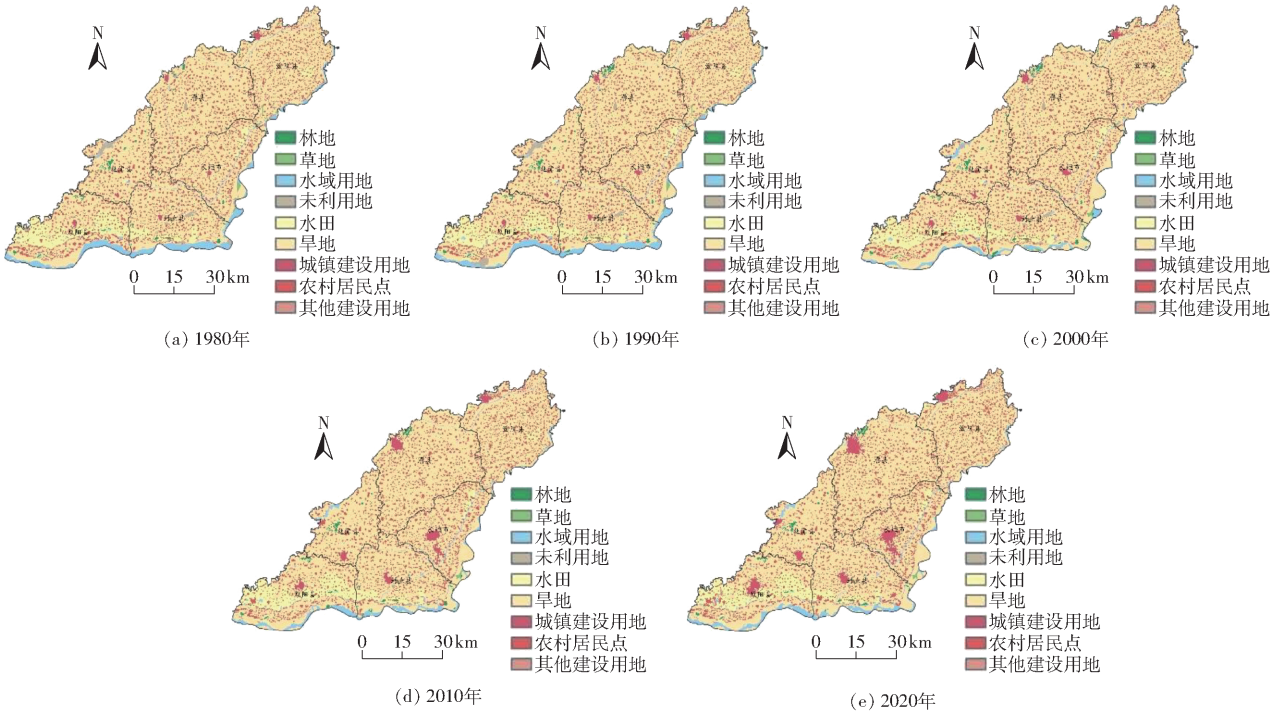

图 2　1980—2020 年研究区土地利用现状

Fig. 2　Land use status of study area from 1980 to 2020

在空间上，草地、水域用地以及未利用地变化区均集中分布于原阳县和封丘县的黄河沿岸带，反映了黄河对该地区生态性用地格局形成的重要作用。

3. 2　土地利用累积动态度

3. 2. 1　动态度空间格局

计算各采样网格中心点的土地利用动态度并运用 Kriging 空间插值法，实现动态度的栅格化处理。从图 3 可看出，经过栅格化处理的动态度，能够较好反映沿黄 6 县在不同时段的土地利用变化特点。其中，1980—1990 年和 1990—2000 年 2 个时段的土地利用变化较为平缓，整体动态度偏低。但由于原阳县和封丘县南部以及长垣市东南等地邻近黄河，受黄河沿岸的水域湿地变化影响较大，使得该地区动态度的高值区多集中于此，且 1990—2000 年的变化强度高于 1980—1990 年；自 21 世纪初以来，沿黄 6 县土地利用变化加剧明显。2000—2010 年，南部黄河沿岸以及各主要乡镇周边土地利用开发活动强烈，动态度偏高，其相对高值区（大于 3%）主要分布在封丘县的荆隆宫乡、曹岗乡、李庄镇以及长垣县的恼里镇。2010—2020 年，土地利用变化强度有所放缓，但高值区更集中分布于各县域的建成区周边地带。

3. 2. 2　累积动态度时序过程

基于各时段栅格化处理的动态度数据，实现沿黄 6 县土地利用累积动态度（CDDLU）提取，采用 K-means 聚类法并依据 CDDLU，划分 3 个土地利用变

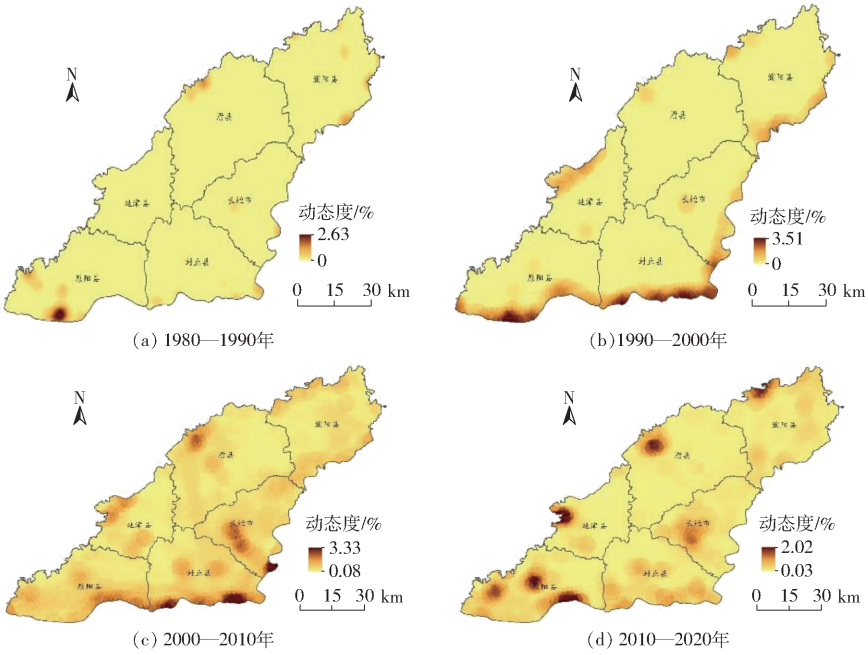

图 3 1980—2020 年研究区不同时段土地利用动态度分布

Fig. 3 Dynamic degree of land use in different periods in study area from 1980 to 2020

化过程类型(类型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)(图 4)。研究结果表明,CDDLU 能较好表征长时间序列土地利用变化的时空过程信息,1980 年来,沿黄 6 县土地利用变化呈显著的空间异质性和阶段性分布特点,尤其对于黄河沿岸及若干主要县域建成区周边地区而言,土地利用变化频繁且强烈,差异性时序过程特征突出。具体表现为:

(1)CDDLU 范围为 0.16% ~7.30%,其中高值区主要分布在黄河沿岸及其邻近缓冲区,受人类农业开发活动以及黄河湿地退化等因素影响较大,同时各县域建成区周边的土地利用开发活动频繁,土地利用稳定性差,导致对应的 CDDLU 也偏高。中部、北部等地的 CDDLU 偏低,主要是由于该地区为传统商品粮种植区,土地利用变化时序过程平缓。从行政区来看,封丘县的 CDDLU 均值最高,达到 1.38%,位于其境内的李庄镇、恼里镇和曹岗乡以及位于延津县的新乡食品纺织工业聚集区的 CDDLU 均值依次为 3.77%、2.87%、2.66% 和 2.96%,土地利用变化过程强烈。然而,作为河南省县域粮食产量最高的滑县,CDDLU 仅为 0.64%,土地利用变化时序过程平缓,实地考察资料显示,该地区支柱性产业以农业生产及其次级加工为主,耕地数量保护较好。

(2)类型Ⅰ(CDDLU 为 2.97% ~7.30%)所对应的土地处于剧烈时序过程变化状态,面积占比为 5.44%,主要分布在南部黄河沿岸,西北部也分布着少量该过程类型土地。上文分析显示,该地区土地利用变化以生态性用地(草地、水域用地和未利用地)为主,强烈的生态性用地变化过程,易导致其生态系统脆弱。因此,类型Ⅰ所属地区应尤为关注“黄河流域生态保护和高质量发展”国家级战略契机,以促进生态性用地趋于稳定及良性结构发展;类型Ⅱ(CDDLU 为 1.04% ~2.96%)面积占比为 23.75%,时序过程较为明显,土地利用变化频繁,空间上呈环研究区边缘地带分布的特点,同时原阳县、封丘县、长垣县等县域中心建成区周边地带也分布一定面积的该类型土地,后续国土空间管理与生态保护建设需重点关注该类型区对应的土地;类型Ⅲ

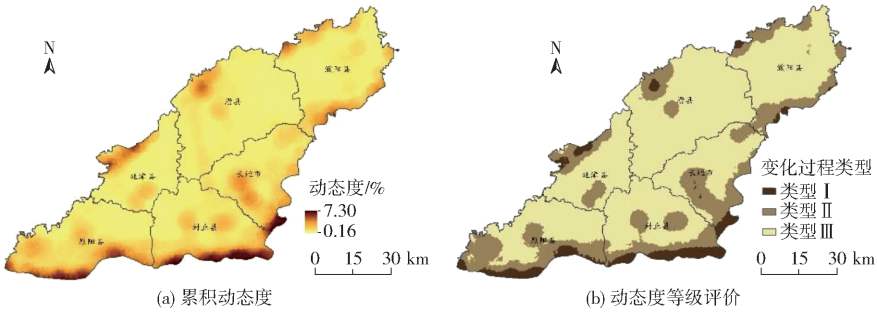

图 4 研究区土地利用累积动态度评价

Fig. 4 Evaluation of CDDLU in study area

（CDDLU 为 0.16% ~1.03%）为该地区最主要的土地利用变化时序过程类型，面积占比达到 70.81%，广泛分布于研究区中部、南部等地，与耕地分布存在较高重合性，时序过程较为平缓，需重点维持其对应的用地功能和结构面积稳定性。从行政区来看，长垣县、封丘县和原阳县的土地利用变化显著区（类型Ⅰ和类型Ⅱ）依次占对应土地总面积的 48.61%、48.34% 和 46.17%，而滑县的变化显著区面积占比仅为 9.52%，各县域单元时序过程的类型差异明显。

3.3　土地利用变化聚集性模式

将 CDDLU 赋值给网格中心点，继而采用 NNI 指数，来探索单一空间尺度所对应的土地利用变化过程类型的聚集性特点（表 2 和图 5）。从时序过程的全域 NNI 指数来看，沿黄 6 县土地利用动态演化特征突出。其中，类型Ⅰ和类型Ⅱ的时序过程显著，对应样点数分别为 160 个和 530 个，在 99% 置信度下，二者均处于聚集分布状态。类型Ⅲ的时序变化过程平缓，对应样点数为 1 384 个，分布均匀，同样呈现统计显著性；从河网、公路网基本线性要素的不同缓冲区 NNI 统计结果来看，在距离线性要素较近的范围内（1 km 和 2 km），类型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ均处于聚集分布状态，但随着缓冲区范围增加，类型Ⅰ的聚集性程度先增后减，类型Ⅱ的聚集性则持续减弱，类型Ⅲ的聚集性同样持续减弱，并同时导致其分布模式由聚集分布逐渐转变为均匀分布，说明土地利用变化的时序过程受距离道路、河流远近影响显著，但影响类型和范围均存在差异。

表 2　3 类土地利用变化时序过程的 NNI 指数

Tab. 2　NNI of spatial and temporal processes for land use change types

变化过程类型	样点数/个	最近邻指数 R	分布模式	Z	P
Ⅰ	160	0.36	聚集	-15.42	<0.001
Ⅱ	530	0.76	聚集	-10.68	<0.001
Ⅲ	1 384	1.36	均匀	25.78	<0.001

注：置信度为 99%。

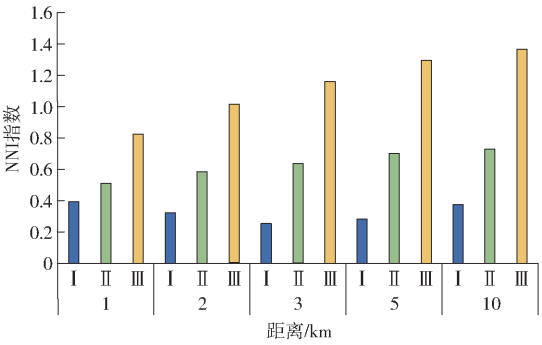

图 5　研究区线性要素在不同缓冲区范围内的 NNI 指数

Fig. 5　NNI statistical results of linear elements in different buffer ranges in study area

采用 Ripley's k 指数描述多空间尺度（1、2、3、5、10 km）对应的时序过程类型的聚集性特征，以研究沿黄 6 县土地利用变化空间模式的尺度性效应。从图 6 可以看出，在分析尺度 1 km 下，3 个时序变化过程类型的观测 K 值均小于预期 K 值，表示该空间尺度下各时序过程类型均处于离散状态，但随着空间尺度递增，其差值转为正数且绝对值也越来越大，聚集性逐渐提高。同时，在不同空间尺度下，类型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的离散和聚集性程度也存在差异。类型Ⅰ聚集性的递增速度最快，且至分析尺度 9 km，其观测 K 值与预期 K 值的差值达到最大（10 073.30），而对应的类型Ⅱ为 4 543.53。类型Ⅲ在分析尺度 1 km 的离散程度最高，但随着空间尺度增大，聚集性递增程度在 3 个类型中最低，其在 9 km 处的观测 K 值与预期 K 值差值仅为 2 879.82。上述分析结果表明，沿黄 6 县土地利用变化程度受空间尺度影响较大，但变化越强烈的地区，其受空间尺度影响程度越弱。因此，沿黄 6 县在后续土地利用开发管理中，应在重点考虑线状要素（黄河和主干道路）布局的前提下，根据线状要素近邻程度特点，制定差别化的利用管理措施，以促进土地利用优化布局。

4　讨论

土地利用变化为自然、社会和经济等因素驱动下的复杂性过程。本文从动态度着手，通过对单一

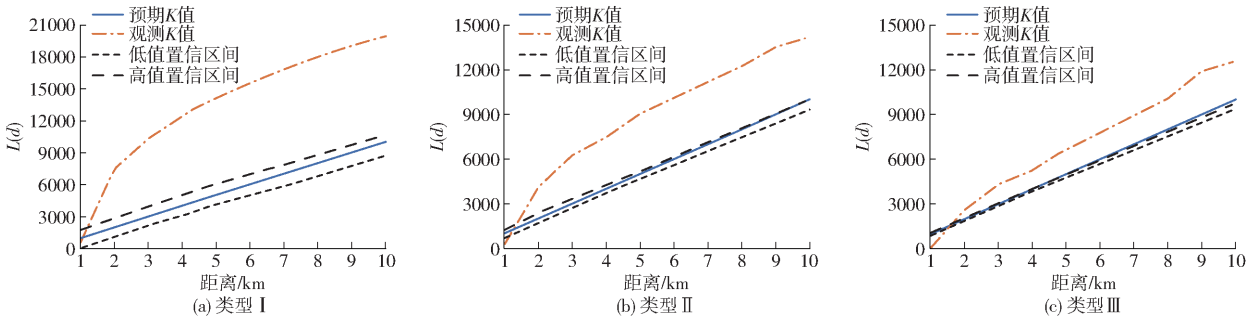

图 6　研究区类型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ在各缓冲区下的 Ripley's k 指数统计结果

Fig. 6　Statistical results of Ripley's k indices for land use change types (Ⅰ, Ⅱ and Ⅲ) under various buffers in study area

状态过程的差值累加来实现土地利用变化的时序过程提取,为土地利用变化的时空模式挖掘提供了新思路。但由于地理事件或地理现象的空间统计模式存在尺度依赖,本文得出的结论只是在特定采样尺度下(2 km×2 km)的特定结论,是该尺度下土地利用变化的时序过程规律的表征,但采样方式和网格单元的取值方法不同,或会对土地利用变化的时序过程模式结论产生影响,采样方式取决于其对时空模式结论的影响最小,因此,这种影响的规律性需要进一步定量研究[18-21];其次,CDDLU 模型是本文提出的概化土地利用变化时序过程核心手段,但由于不同类型划分结果会对土地利用变化的时空模式的度量产生影响,如何依据 CDDLU 来科学划分不同过程类型,为影响时空模式挖掘的关键,后续需全面分析不同分级结果对土地利用变化模式度量的影响;再次,河南沿黄 6 县位于黄河以北,是我国重要的粮食主产区,其土地利用格局形成受黄河、基础交通道路信息影响较大,为保证时空模式挖掘的简洁性,本文选取包括黄河和道路因子在内的线性要素进行分析,重点讨论了上述线性要素的不同邻近性对土地利用变化时序过程的影响,但这种随着线性要素邻近性的时空模式还受到其他因素影响,后续需进一步对其他要素进行论证以提高模式的精确性。

5 结论

(1)河南沿黄 6 县土地利用变化呈显著的空间异质性与阶段性分布特点。耕地面积缓慢下降,城镇建设用地扩张明显,水域用地和林地面积波动变化,同时在前期黄河沿岸的农业土地开发活动尤为强烈,至后期,原阳县、封丘县和长垣县等县域建成区周边地带土地利用变化强烈。

(2)CDDLU 能较好表征长时间序列土地利用变化的时空过程信息。类型Ⅰ、Ⅱ均处于聚集分布状态,面积占比分别为 5.44%、23.75%,类型Ⅲ均匀分布;变化时序过程受道路、河流距离影响较大,但影响类型和范围存在差异。距离线性要素较近范围的类型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ均处于聚集分布状态,但随着缓冲区范围增加,类型Ⅰ的聚集性程度先增后减,类型Ⅱ、Ⅲ则持续减弱;变化时序过程受空间尺度影响较大,变化越强烈地区,受空间尺度影响的程度越弱。分析尺度 1 km 下,各类型均处于离散状态,但随着空间尺度递增,聚集性逐渐提高;沿黄 6 县土地利用开发管理,应适度考虑黄河和主干道路等线性要素近邻特点,制定差别化的利用管理措施,以促进当地土地利用优化布局。

参 考 文 献

[1] 梁鑫源, 金晓斌, 孙瑞, 等. 粮食安全视角下的土地资源优化配置及其关键问题[J]. 自然资源学报, 2021, 36(12): 3031-3053.
LIANG Xinyuan, JIN Xiaobin, SUN Rui, et al. Optimal allocation of land resources and its key issues from a perspective of food security[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(12): 3031-3053. (in Chinese)

[2] 周浩, 胡凌, 陈竹书. 基于量子遗传投影寻踪的长株潭地区耕地系统安全评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 268-274,302.
ZHOU Hao, HU Ling, CHEN Zhushu. Evaluation on farmland system security in Chang-Zhu-Tan Region based on quantum genetic projection pursuit method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 268-274,302. (in Chinese)

[3] 赵宏飞, 何洪鸣, 白春昱, 等. 黄土高原土地利用变化特征及其环境效应[J]. 中国土地科学, 2018, 32(7): 49-57.
ZHAO Hongfei, HE Hongming, BAI Chunyu, et al. Spatial-temporal characteristics of land use change in the Loess Plateau and its environmental effects[J]. China Land Science, 2018, 32(7): 49-57. (in Chinese)

[4] 王勇, 孙瑞欣. 土地利用变化对区域水-能源-粮食系统耦合协调度的影响:以京津冀城市群为研究对象[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 582-599.
WANG Yong, SUN Ruixin. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 582-599. (in Chinese)

[5] 刘蒙罢, 张安录. 建党百年来中国耕地利用政策变迁的历史逻辑及优化路径[J]. 中国土地科学, 2021, 35(12): 19-28.
LIU Mengba, ZHANG Anlu. Historical logic and optimization path of the policy changes in China's cultivated land use in the past 100 years since the founding of the CPC[J]. China Land Science, 2021, 35(12): 19-28. (in Chinese)

[6] 鞠洪润, 左丽君, 张增祥, 等. 中国土地利用空间格局刻画方法研究[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 143-159.
JU Hongrun, ZUO Lijun, ZHANG Zengxiang, et al. Methods research on describing the spatial pattern of land use types in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 143-159. (in Chinese)

[7] 宋戈, 杨雪昕, 高佳. 三江平原典型地区水田分布格局变化特征[J]. 中国土地科学, 2017, 31(8): 61-68.
SONG Ge, YANG Xuexin, GAO Jia. Study on the distribution patterns and characteristics of paddy cropland in the typical area

of Sanjiang Plain[J]. China Land Science, 2017, 31(8): 61 – 68. (in Chinese)

[8] 周浩, 雷国平, 杨雪昕. 三江平原典型流域土地利用格局变化与空间分异研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 142 – 151.
ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin. Land use change pattern and its spatial differentiation in typical basin of Sanjiang Plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 142 – 151. (in Chinese)

[9] 宋小青, 吴志峰, 欧阳竹. 1949 年以来中国耕地功能变化[J]. 地理学报, 2014, 69(4): 435 – 447.
SONG Xiaoqing, WU Zhifeng, OUYANG Zhu. Changes of cultivated land function in China since 1949[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(4): 435 – 447. (in Chinese)

[10] 丁智强, 华红莲, 王平, 等. 哈尼梯田遗产核心区土地利用信息图谱及地形梯度效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 225 – 234.
DING Zhiqiang, HUA Honglian, WANG Ping, et al. Land use change geo-spectrum and its topographic gradient effect in the core areas of Hani Terraces, a world heritage site[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 225 – 234. (in Chinese)

[11] 王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 地理学时空数据分析方法[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1326 – 1345.
WANG Jinfeng, GE Yong, LI Lianfa, et a1. Spatio-temporal data analysis in geography[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1326 – 1345. (in Chinese)

[12] 梁明, 聂拼, 陆胤昊, 等. 淮南市土地利用程度变化过程的时空演化特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 99 – 106.
LIANG Ming, NIE Pin, LU Yinhao, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of land use intensity change process of Huainan[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 99 – 106. (in Chinese)

[13] 罗巍, 杨玄酯, 杨永芳, 等.黄河流域水–能源–粮食纽带关系协同演化及预测[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 608 – 619.
LUO Wei, YANG Xuanzhi, YANG Yongfang, et al. Co-evolution of water – energy – food nexus in the Yellow River Basin and forecast of future development[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 608 – 619. (in Chinese)

[14] 许玉洁, 刘曙光. 黄河流域绿色创新效率空间格局演化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 627 – 644.
XU Yujie, LIU Shuguang. Spatial pattern evolution and influencing factors of green innovation efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 627 – 644. (in Chinese)

[15] 茹少峰, 马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价、空间分析及预测[J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1722 – 1734.
RU Shaofeng, MA Ruhui. Evaluation, spatial analysis and prediction of ecological environment vulnerability of Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(7): 1722 – 1734. (in Chinese)

[16] 钟莉娜, 王军, 白中科, 等. 农用地整理对区域景观动态与生态风险影响研究：以福建省建溪流域为例[J]. 中国土地科学, 2019, 33(1): 73 – 82.
ZHONG Li'na, WANG Jun, BAI Zhongke, et al. Study on the impact of agricultural land consolidation on regional landscape dynamics and ecological risk: a case study of Jianxi watershed in Fujian Province[J]. China Land Science, 2019, 33(1): 73 – 82. (in Chinese)

[17] 任珩, 赵成章, 安丽涓. 基于 Ripley 的 K(r)函数的“毒杂草”型退化草地狼毒与西北针茅种群空间分布格局[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 59 – 64.
REN Heng, ZHAO Chengzhang, AN Lijuan. Spatial point patterns of *Stellera chamaejasme* and *Stipa krylovii* populations in degraded grassland of Noxious and Miscellaneous types based on Ripley's $K(r)$ function[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(1): 59 – 64. (in Chinese)

[18] 袁磊, 杨昆. 土地利用变化驱动力多尺度因素的定量影响分析[J]. 中国土地科学, 2016, 30(12): 63 – 70.
YUAN Lei, YANG Kun. An analysis of quantitative impacts of multi-scale factors on driving forces in land use change[J]. China Land Science, 2016, 30(12): 63 – 70. (in Chinese)

[19] 路中, 雷国平, 郭一洋, 等. 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1894 – 1906.
LU Zhong, LEI Guoping, GUO Yiyang, et al. Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1894 – 1906. (in Chinese)

[20] 乔治, 蒋玉颖, 贺曈, 等. 土地利用变化模拟研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5165 – 5176.
QIAO Zhi, JIANG Yuying, HE Tong, et al. Land use change simulation: progress, challenges, and prospects[J]. Acta Ecologica Sinica,2022, 42(13): 5165 – 5176. (in Chinese)

[21] 王全喜, 宋戈. 下辽河平原典型区耕地格局变化及其空间要素驱动[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 275 – 283.
WANG Quanxi, SONG Ge. Changes of cultivated land pattern and its spatial driving factors in the typical regions of Lower Liaohe Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(24): 275 – 283. (in Chinese)