

水利水电技术
Water Resources and Hydropower Engineering
ISSN 1000-0860, CN 11-1757/TV

《水利水电技术》网络首发论文

题目： 基于地理探测器的武汉市土地利用变化及其驱动机制探讨
作者： 童威，郎丰铠
收稿日期： 2020-10-15
网络首发日期： 2021-01-14
引用格式： 童威，郎丰铠. 基于地理探测器的武汉市土地利用变化及其驱动机制探讨. 水利水电技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1757.TV.20210113.1814.018.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于地理探测器的武汉市土地利用变化及其驱动机制探讨

童威^{1,2}, 郎丰铠^{1,2}

(1.中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2.中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘要：为揭示武汉市近 20 年土地利用时空变化特征，并定量分析引起土地利用变化的因素，首先基于 2000—2019 年五期 Landsat 影像，分析了武汉市土地利用结构变化特征、动态变化、转移趋势，然后利用地理探测器探讨了各因素对武汉市土地利用变化的影响强度及交互作用机制。结果表明：（1）近 20 年来武汉市水域面积逐年下降，由 2000 年的 1524.57km² 缩减到 2019 年的 1054.66km²；而建设用地面积逐年增加，由最初的 640.66km² 扩张到研究末期的 1251.06km²；其它土地利用类型的面积均为非单调性的变化；（2）因子探测发现各年份因子对土地利用变化的影响强度不尽相同，但人口密度、GDP、夜间灯光亮度与固定资产投资的 q 值始终接近或大于 0.1，说明人口压力与经济活动始终占据主导地位；（3）交互探测表明各年份因子间的交互作用均表现为双因子或非线性增强，并且土壤类型、人口密度、GDP、夜间灯光亮度与其它因子间交互作用 q 值大都在 0.15 以上，说明各因子之间的交互作用进一步促进了土地利用的变化。

关键词：土地利用/土地覆被变化；土地利用结构；地理探测器；驱动力；武汉市；GIS；影响因素

中图分类号：P962

文献标志码：A



开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Geodetector-based analysis on land-use variation and its driving force in Wuhan

TONG Wei^{1,2}, LANG Fengkai^{1,2}

(1.School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

收稿日期：2020-10-15

基金项目：国家自然科学基金项目（41977220, 61601465）；江苏省自然科学基金项目（BK20160244）

作者简介：童威（1993—），男，硕士研究生，主要从事遥感图像处理与应用的研究。E-mail: fly_stone@cumt.edu.cn

通信作者：郎丰铠（1987—），男，副教授，博士，主要从事极化 SAR 影像处理的研究。E-mail: langfk@cumt.edu.cn

Abstract: In order to reveal the spatiotemporal variation characteristics of land-use in Wuhan in recent 20 years and quantitatively analyze the factors causing the variation of land-use, the variation characteristics, dynamic change, transfer trend of the land-use in Wuhan are analyzed in accordance with the Landsat images of five phases from 2000-2019 at first, and then the influencing intensity and interaction mechanism of all the factors on the land-use variation in Wuhan are explored with geodetector. The results show that (1) the water area in Wuhan gradually decreases year by year in recent 20 years with the reduction from 1524.57km² in 2000 to 1054.66km² in 2019, while the area of construction land gradually increases by years with the expansion from the initial area of 640.66km² to 1251.06km² at the last phase of the study; moreover, the areas of all the other kinds of land-use are non-monotonically changed; (2) the factor detection finds out that the influencing intensities from the factors of all the relevant years are not exactly the same, but the q values of population density, GDP, nighttime light brightness and fixed asset investment are all along close to or greater than 0.1, which indicates that both the population pressure and the economic activities always occupy the dominant positions; (3) the relevant interactive detection shows that the interactions among the factors of all the years exhibit dual-factor or nonlinear enhancement, while the q values of the interactions among soil type, population density, GDP, night light brightness and the other factors are mostly above 0.15, which indicates that the variation of land-use is further promoted by the interactions among all the factors.

Key words: land-use/land-cover variation; land-use structure; geodetector; driving forces; Wuhan; GIS; influencing factors

0 引言

土地既是人类生存和发展的基本自然资源，也是重要的物质基础^[1]。土地利用/覆被变化（Land use/cover change, LUCC）是全球变化研究最活跃的领域之一，土地利用是人类对土地进行开发利用有目的性的活动，强调土地的社会经济属性；而土地覆被是指地球表层的自然状态或覆被状况，侧重土地的自然地理特征^[2-3]。人类活动对自然环境的影响愈发深远，土地利用变化则是这种影响的重要表征之一，其结果是地表覆被状况的转变。土地利用/覆被变化是导致全球变化的关键因素，是一个日益加快、影响越来越广泛的过程。在各种不同尺度的土地利用/覆被变化研究中，由城市化进程导致的区域土地利用/覆被变化引起了各领域学者的广泛关注^[4]。遥感技术的快速发展为土地利用/覆被变化提供了新的技术手段，在土地利用/覆被变化研究中发挥着举足轻重的作用，目前利用遥感技术研究土地利用/覆被变化已成常态^[5-7]。

土地利用变化的驱动力是指导致土地利用结构与方式发生改变的因素，包括自然和人为因素；自然因素间接影响土地利用变化，在大尺度上作用明显，而人为因素则直接决定着土地利用的变化，在区域土地利用变化中占据主导地位^[8]。一方面，土地利用变化驱动力分析是进行土地综合研究的基础，对于未来土地高效利用与可持续发展具有重要意义；另一方面，确定导致土地利用变化的驱动力，有助于决策者制定合理的政策，进而降低或避免土地利用变化带来的负面影响^[9]。目前，土地利用变化驱动力分析主要分为定性和定量两大类：其中定性分析包括对驱动因素的罗列、排序、描述等，但该方法无法对驱动因素做量化的解释^[10]，常用于对难以定量分析的诸如政策^[11]、法律法规^[12]、文化^[13]等因素的探讨；量化方法主要为基于经验的统计分析模型，如李丽国等^[14]运用主成分分析法（Principle Component Analysis, PCA）探讨了乌鲁木齐市土地利用变化的驱动力，结果表明经济发展、人口增长及产业结构调整是该区域土地利用变化的主要原因；常小燕等^[15]利用 Logistic 回归模型（Logistic Regression Model，

LRM)分析了山东省微山县采煤塌陷区土地利用演变的驱动因素,研究表明距居民点的距离是影响耕地、建设用地及水域变化的主要驱动因子,距工矿的距离是影响塌陷积水区变化的主要驱动因子;BU C等^[16]利用典范对应分析法(Canonical Correspondence Analysis, CCA)探讨了黄土高原六道沟土地利用变化的驱动力,研究表明该地区的土地利用变化主要受地形、土壤类型、湿度的制约。徐小明等^[17]利用冗余分析法(Redundancy Analysis, RDA)探讨了山西省农牧交错区左云县土地利用变化的主导因素,结果发现土壤有机碳含量、高程、GDP、人口密度是影响该地区土地利用变化的关键因素。THAPA R B等^[18]运用层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)揭示了尼泊尔加德满都河谷城市土地利用变化的因素,研究表明该方法能够有效揭示土地利用变化的主导因子,但存在依赖专家知识、主观性较强的缺点。位欣等^[19]基于模拟退火遗传算法分析了黄石市耕地变化的原因,结果表明模拟退火遗传算法进行多变量筛选分析具有一定的优势,避免了常规方法的局限性,为土地利用变化驱动力分析提供了新的方法和思路。上述基于经验的统计分析模型在定量解释土地利用变化的因素具有指导性的作用,但无法体现地理现象独有的空间异质性特征,需要消除自变量间存在的多重共线性影响,并且在解释因子交互作用机理方面存在明显的缺陷。

因此,本文将研究区定位在武汉市,该区域江河纵横、湖泊众多,长江、汉水交汇于市中心,把整个城市分成三块区域,形成水陆交替的多样化地形,其地理位置位居中部的中心,素有“九省通衢”之称;同时它还是国务院批准的全国首批“两型”社会建设综合配套改革试验区,无论是地理位置还是国家发展战略都是长江流域的典型区域。近年来,由于经济建设的加剧,使得武汉市的可利用土地面积逐渐减少,人地矛盾进一步凸显;首先分析该区域土地利用结构及各土地利用类型转移趋势,然后从自然地理系统、社会系统、经济系统选择了11个因子,利用地理探测器不仅定量探讨武汉市土地利用变化的主导因素,而且进一步揭示各因子之间的交互作用对土地利用变化的影响机制;从而有效避免因子间的多重共线性带来的结果不确定性,同时还能从多方面认识武汉市土地利用变化的动因。研究结果以为武汉市土地利用管控、结构优化、政策制定提供参考,促进武汉市经济与生态建设协调可持续发展,同时为其它相似城市的土地利用变化原因分析提供案例借鉴。

1 研究区概况

武汉市位于中国的中部、湖北省东部,是湖北省的省会、长江中游重要的城市。研究区地理位置如图1所示,经纬度范围为 $113^{\circ}41'E-115^{\circ}05'E$ 、 $29^{\circ}58'N-31^{\circ}22'N$,高程范围为 $-142\sim 776m$,其北依黄冈,东临鄂州,南边与咸宁接壤,西部与孝感紧邻,是湖北省的政治、经济、文化中心。辖区内共有13个区,包括7个中心城区与6个远城区。截至2019年,武汉市面积约 $8569.15km^2$,常住人口1121.20万人^[20]。武汉市南部分布有接近东西走向的条带状丘陵,四周分布有密集的树枝状冲沟,市内近百个大小湖泊星罗棋布,形成了水系发达、山水交融的多样化地形,是湖北省重要的商品粮生产基地。武汉市属于亚热带季风性湿润气候,具备雨量充沛、日照充足、四季分明的特点,年平均降水量为1205mm。

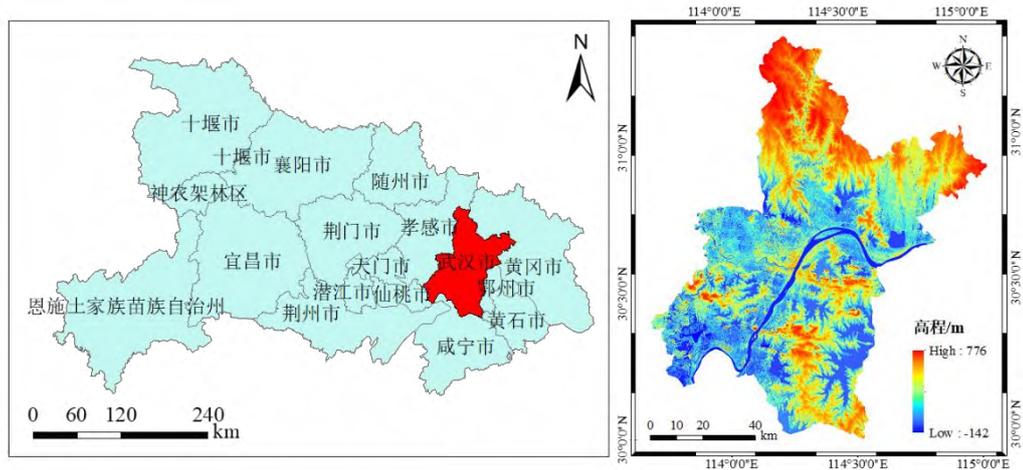


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

文中使用的数据来源于：（1）Landsat 遥感影像来源于美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>），包含 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年五期影像，分辨率均为 30m，各年份影像获取时间均为 6—10 月，在一定程度上降低了季节变化对 LUCC 的影响，轨道号分别为：122/038、122/039、123/038、123/029，各期影像云量均小于 5% 且成像质量良好；（2）武汉市 SRTM DEM 来源于美国航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA, <https://earthdata.nasa.gov/>），其空间分辨率为 30m；土壤类型、地貌类型、气温和降水数据来源于中科院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn/>），空间分辨率均为 1km；（3）武汉市夜间灯光亮度来源于美国国家海洋与大气管理局（National Oceanic and Atmosphere Administration, NOAA, <https://ngdc.noaa.gov/>），空间分辨率为 1km；（4）武汉市各区社会经济统计数据来源于各年份统计年鉴（2000—2019 年）及武汉市人民政府网站（<http://www.wuhan.gov.cn/>）。

2.2 数据处理

首先对各年份影像分别进行预处理，包括镶嵌、波段合成、滤波等，其中 Landsat 5、Landsat 7 采用 5、4、3 波段合成，Landsat 8 采用 6、5、4 波段合成，所使用的波段空间分辨率均为 30m，投影方式为 Krasovsky_1940_Albers，利用武汉市矢量边界进行裁剪得到该区域各年份影像。然后采用支持向量机（Support Vector Machine, SVM）对各年份影像进行地物分类，结合徐新良等^[21]的中国土地利用/覆盖数据分类系统，并考虑到武汉市的实际地物分布与遥感影像的可解译性，将该区域土地利用类型分为水域、草地、建设用地、耕地、林地与未利用地；最后利用 Google Earth 高分辨率影像随机选择样本进行精度评价，各年份影像的分类总体精度均在 85% 以上，kappa 系数均优于 0.8，满足土地利用/覆被变化分析的精度要求^[22]；武汉市各年份土地利用空间分布如图 2 所示。

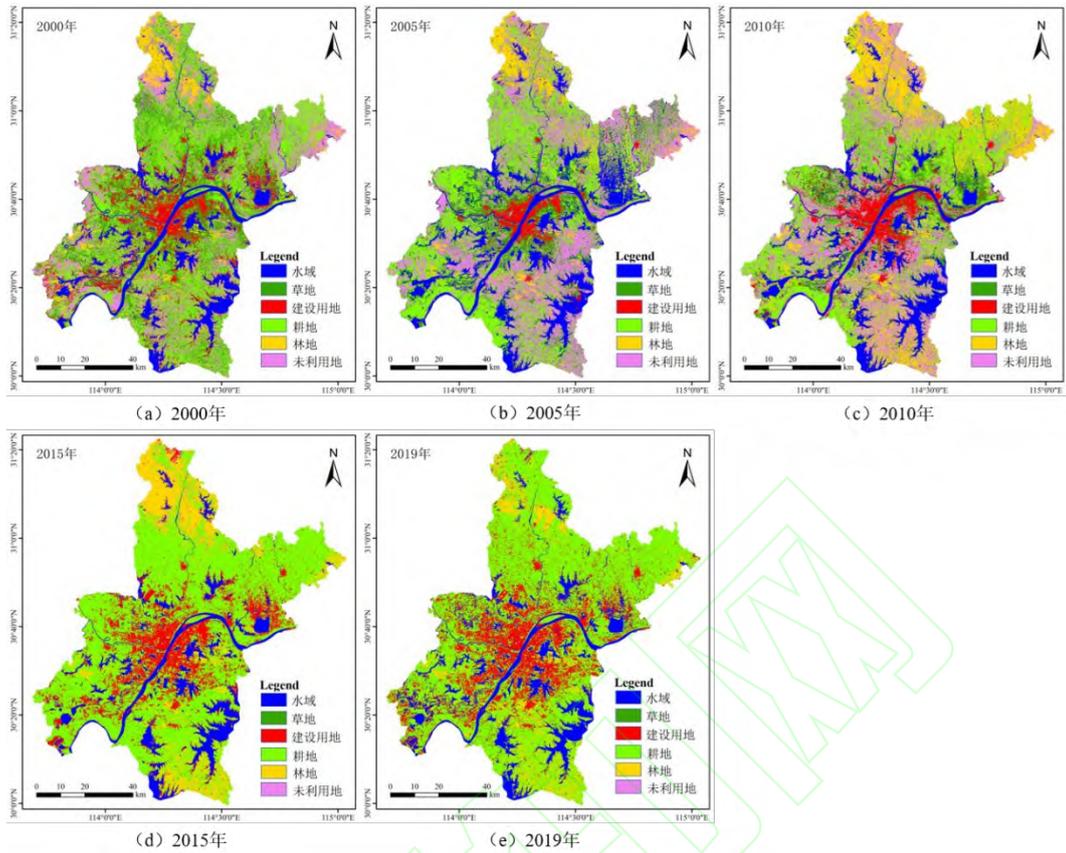


图2 武汉市各年份土地利用空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use in Wuhan in different years

2.3 研究方法

2.3.1 土地利用动态度

土地利用动态度可以定量的描述某种土地利用变化的幅度^[23,24]。计算方法如下

$$K = \frac{S_{t_2} - S_{t_1}}{S_{t_1}} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中， κ 为土地利用动态度 (a^{-1})，其值越大，则该土地利用类型面积变化幅度越大，相对比较活跃； s_{t_1} 、 s_{t_2} 分别为研究初期、研究末期某土地利用类型的面积 (km^2)； T 为研究时间间隔 (a)。

2.3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵以矩阵的方式定量反映研究区各时期每种土地利用类型间的转化数量和转移方向^[25]，可以较为清晰的刻画区域土地利用的变化趋势。其数学形式为

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \cdots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{n1} & T_{n2} & \cdots & T_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, T_{ij} 为第 i 种土地利用类型转化为第 j 种土地利用类型的面积 (km^2); n 为土地利用类型的数目。

2.3.3 地理探测器

地理探测器是一种具有地理特性的统计分析方法,能够反映同一区域的相似性及不同区域的差异性,从而得到地理现象的空间异质性特征及其背后的驱动因素^[26,27]。利用地理探测器定量解释武汉市土地利用变化的空间异质性特征及其驱动因素,包括因子探测及交互探测。

(1) 因子探测。揭示因变量土地利用变化 Y 的空间分异特征,以及因子 X 对因变量 Y 空间分异性的解释程度,模型表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2 \quad (4)$$

式中, q 为因子 X 对土地利用变化空间分异性的解释程度,取值范围为 $[0,1]$, q 值越大,说明该因子对土地利用变化的影响越大; $h = 1, 2, \dots, L$ 为因子 X 分区或分类数目; N_h 和 N 分别为因子 X 第 h 类的样本数与区域总样本数; σ_h 和 σ 分别为因子 X 第 h 类的方差与区域总方差。

(2) 交互探测。判别因子 X_i 和 X_j 共同作用相对单因子作用时解释力的差异。首先分别计算因子 X_i 和 X_j 对于 Y 的解释力 ($q(X_i)$ 、 $q(X_j)$), 然后计算两因子交互作用时的解释力 ($q(X_i \cap X_j)$), 并比较 $q(X_i)$ 、 $q(X_j)$ 与 $q(X_i \cap X_j)$, 两因子之间的交互作用类型如表 1 所列。

表1 自变量交互作用类型

Tab. 1 Interaction types of independent variables

图示	判别标准	作用类型
	$q(X_i \cap X_j) < \min(q(X_i), q(X_j))$	非线性减弱
	$\min(q(X_i), q(X_j)) < q(X_i \cap X_j) < \max(q(X_i), q(X_j))$	单因子非线性减弱
	$q(X_i \cap X_j) > \max(q(X_i), q(X_j))$	双因子增强
	$q(X_i \cap X_j) = q(X_i) + q(X_j)$	独立
	$q(X_i \cap X_j) > q(X_i) + q(X_j)$	非线性增强

注: ● $\min(q(X_i), q(X_j))$ ● $\max(q(X_i), q(X_j))$ ● $q(X_i) + q(X_j)$ ↓ $q(X_i \cap X_j)$

3 实验结果及分析

3.1 土地利用结构变化

利用统计分析法得到武汉市不同年份各土地利用类型面积变化，如图 3 所示；从中可以看出，2000—2019 年武汉市水域面积逐年减少，几乎呈现直线下降的趋势，并且下降的速度较为稳定，保持在 1%~2%；草地面积出现“剧烈减少—微弱增加”的现象，占武汉市面积的比例从 2000 年的 31% 减少至 2015 年的 2%，但在 2019 年有微弱上升的趋势，所占比例达到了 6%；建设用地面积变化状况与水域相反，呈现逐年增加的趋势，并且增加的速度较为稳定，保持在 1%~3%，2019 年占比达到了 15%；耕地面积总体表现为“剧烈增加—微弱减少”的现象，并且在 2005—2010 年期间增加速度达到峰值，由 2005 年的 18% 增加到 2010 年的 35%，相比于 2005 年其面积几乎增加了 2 倍，但 2015 年—2019 年其面积出现了微弱下滑的趋势，下降到了 2019 年的 43%；林地面积总体表现为“急剧减少—缓慢增加—稳定”的局面，其面积在 2005 年达到最低值，占武汉市面积的 7%，此后出现缓慢增加的现象，在 2015 年面积占比达到了 13%，此后基本保持不变。未利用地呈现“大幅增加—缓慢减少—稳定”的趋势，在 2005 年达到峰值，占比为 20%，此后面积逐渐减少，在 2015 年面积达到了最低值，占比为 11%。

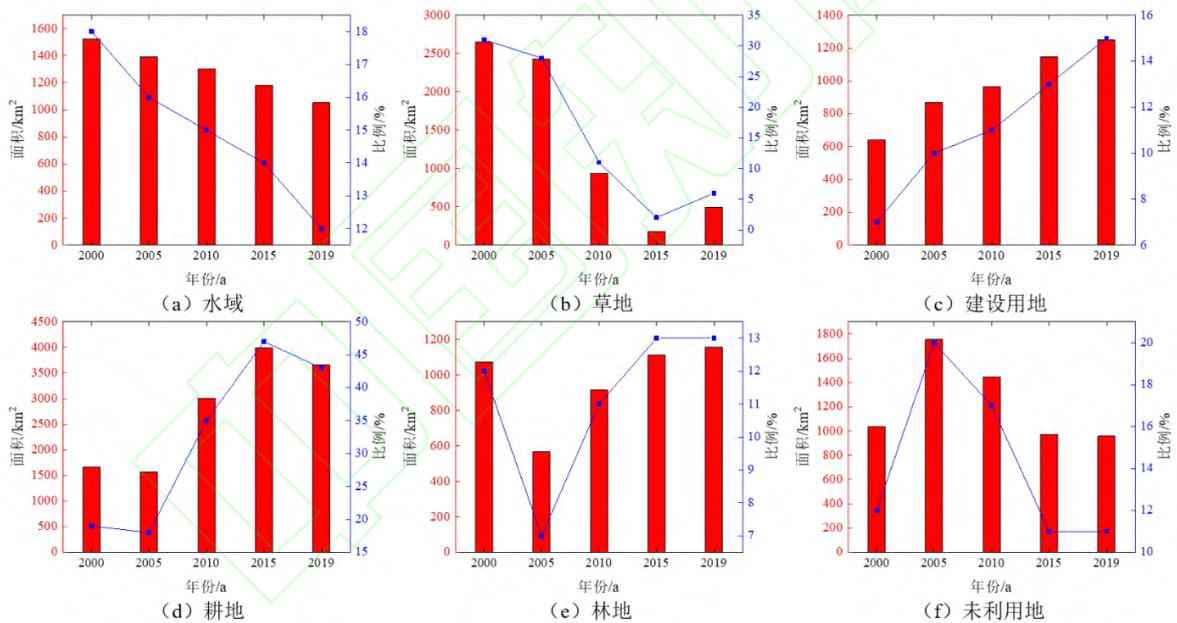


图3 各土地利用类型面积变化

Fig. 3 Area change of each land use type

3.2 土地利用动态度

利用式 (1)，计算出各年份每种土地利用类型变化的面积及动态度（见表 2）。从中分析可知：水域的变化面积在各时间段内都为负值，表明水域面积呈现逐年下降的趋势，各个时间段动态度总体变化不大，变化幅度最大的为 2015—2019 年的 -2.18%；草地面积在各个时间段内也均呈现下滑的趋势，下降幅度逐年增加，在 2010—2015 年期间，达到峰值 -16.24%，仅在 2015—2019 年有增加趋势；建设用地面积表现出逐年增加的态势，并且 2000—2005 年上涨幅度最快，面积增加了 230.06km^2 ，动态度

达到峰值为 7.18%，自此以后动态度较为稳定，没有出现大幅度变化；耕地呈现波动变化的趋势，总体呈现出“减少—增加—减少”的趋势，并且在 2005—2010 年期间，其面积增加了 1445.95km²，动态度达到峰值 18.43%；林地总体呈先减少后增加的趋势，从 2005 年开始，增加面积逐渐减少，动态度直线下降；未利用地与林地变化趋势相反，呈现先增加后减少的趋势，从 2005 年减少面积逐渐下降，动态度在 2010—2015 年达到最低值-6.60%。

表2 2000—2019年武汉市各土地利用类型面积变化及动态度

Tab. 2 Area change and dynamic attitude of each land use type in Wuhan from 2000 to 2019

土地利用类型	2000—2005		2005—2010		2010—2015		2015—2019	
	变化面积 /km ²	动态度/(% a ⁻¹)	变化面积 /km ²	动态度/(% a ⁻¹)	变化面积 /km ²	动态度/(% a ⁻¹)	变化面积 /km ²	动态度/(% a ⁻¹)
水域	-132.28	-1.74	-88.61	-1.27	-120.31	-1.85	-128.71	-2.18
草地	-213.83	-1.62	-1493.71	-12.28	-762.19	-16.24	319.33	36.20
建设用地	230.06	7.18	93.29	2.14	180.76	3.75	106.28	1.86
耕地	-93.12	-1.12	1445.95	18.43	982.06	6.51	-332.07	-1.66
林地	-505.14	-9.42	348.36	12.27	197.19	4.31	45.65	0.82
未利用地	714.25	13.75	-305.21	-3.48	-477.57	-6.60	-10.47	-0.22

3.3 土地利用类型转移分析

武汉市 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2019 年的土地利用转移矩阵如表 3—表 6 所示，表中每行为研究初期某种土地利用类型向研究末期某种土地利用类型转化的面积，对角线为该时段内未发生土地利用类型转移的面积。

2000—2005 年，水域面积转出 376.33km²，其中 34.35%转化为建设用地，26.56%转化为耕地，22.50%转化为草地；水域转入面积达到 244.21km²，主要来自林地和草地。草地转出面积为 1247.87km²，其中 45.20%转化为未利用地，32.93%转化为耕地，9.91%转化为建设用地，8.61%转化为林地；草地转入面积为 1034.04km²，其中 51.94%来自耕地，19.32%来自林地，16.40%来自未利用地。林地的转出面积远大于转入面积，主要转化为水域、草地、耕地、未利用地（见表 3）。2005—2010 年，草地的转出面积远大于转入面积，主要转化为耕地和未利用地，占比分别为 57.65%、27.49%；转入面积主要来自未利用地、耕地与林地，分别占比 44.10%、29.15%、25.12%。而耕地的转入面积远大于转出面积，其中转入面积主要来自草地和未利用地，占比分别为 54.60%、23.45%，主要转化为草地、建设用地、林地与未利用地（见表 4）。2010—2015 年，草地面积大幅减少，主要转化为耕地和林地，转化比例分别为 47.11%、33.92%。而耕地却显著增加，主要来自草地和未利用地，占比分别达到 19.89%和 38.83%。未利用地在此期间也显著减少，主要转化为建设用地、耕地和林地，其中转化为耕地的比例高达 71.44%（见表 5）。2015—2019 年，各土地利用类型整体面积变化不大，主要表现为建设用地与耕地的相互转移，其转移面积分别为 326.24km²、404.30km²，占相应土地利用类型变化总面积的比例分别为 70.31%和 70.89%（见表 6）。

总体来看, 水域在各时期内的转入量均小于转出量, 进一步印证了水域随时间的推移面积逐渐下降的趋势, 并且主要转移为建设用地和耕地; 草地在 2000—2015 年转入量也低于转出量, 仅在 2015—2019 年有反弹现象, 表明草地面积呈先减少后增加的态势; 建设用地面积逐年增加, 转入量大于转出量, 主要来源于耕地和未利用地; 耕地面积先增后减, 表明随着时间的推移与城市化建设的需要, 武汉市建设用地面积不断扩张, 并且这种扩张是以牺牲部分耕地及水域为代价的。

表 3 2000—2005 年武汉市土地利用转移矩阵

Tab. 3 Transfer matrix of land use in Wuhan from 2000 to 2005 km²

土地利用类型		2005 年					
		水域	草地	建设用地	耕地	林地	未利用地
2000 年	水域	1148.01	84.68	129.25	99.94	26.14	36.31
	草地	41.64	1398.23	123.71	410.97	107.50	564.06
	建设用地	19.47	42.94	380.57	76.36	5.42	115.89
	耕地	26.16	537.07	98.61	573.79	46.04	380.68
	林地	136.60	199.81	52.50	175.39	362.27	146.14
	未利用地	20.33	169.54	86.07	232.73	20.21	509.73

表 4 2005—2010 年武汉市土地利用转移矩阵

Tab. 4 Transfer matrix of land use in Wuhan from 2005 to 2010 km²

土地利用类型		2010 年					
		水域	草地	建设用地	耕地	林地	未利用地
2005 年	水域	1106.55	2.47	27.98	171.24	79.34	4.43
	草地	45.03	412.90	119.47	1164.06	135.55	555.11
	建设用地	51.06	6.09	507.07	191.44	62.52	52.43
	耕地	62.82	153.21	121.03	883.09	121.77	227.07
	林地	20.08	132.01	9.89	105.22	277.34	22.97
	未利用地	17.67	231.77	178.54	500.03	239.01	585.54

表 5 2010—2015 年武汉市土地利用转移矩阵

Tab. 5 Transfer matrix of land use in Wuhan from 2010 to 2015 km²

土地利用类型		2015 年					
		水域	草地	建设用地	耕地	林地	未利用地
2010 年	水域	959.33	9.65	80.47	231.00	16.59	6.15
	草地	5.63	68.66	47.38	409.78	295.02	111.98
	建设用地	11.83	3.02	535.87	345.84	19.37	48.06

	耕地	145.82	51.02	279.82	1936.89	192.52	409.01
	林地	54.10	10.75	77.27	273.43	433.22	66.77
	未利用地	6.48	33.28	123.88	799.89	156.12	327.90

表 6 2015—2019 年武汉市土地利用转移矩阵

Tab. 6 Transfer matrix of land use in Wuhan from 2015 to 2019 km²

土地利用类型		2019 年					
		水域	草地	建设用地	耕地	林地	未利用地
2015 年	水域	898.88	1.73	35.75	221.47	22.02	3.52
	草地	1.41	64.92	6.99	45.86	44.33	12.92
	建设用地	48.61	13.49	680.77	326.24	31.13	44.53
	耕地	95.86	216.81	404.30	2489.19	310.29	480.81
	林地	5.72	132.52	30.60	182.43	686.61	75.27
	未利用地	4.18	66.28	92.65	399.99	64.42	342.58

3.4 土地利用变化驱动机制探讨

2000—2019 年武汉市各土地利用类型均发生了不同程度的变化，根据研究区的实际情况与数据的可获取性，同时考虑到所选因子的系统性与代表性，从自然地理系统、社会系统、经济系统选取了 11 个影响因子（其中 2019 年因相关数据缺失，暂时不做分析），用于探测武汉市土地利用变化的驱动机制，各因子及其含义如表 7 所列。

表 7 各影响因子含义

Tab. 7 Meaning of each impact factor

系统类型	要素	因子	因子含义
自然地理系统	地形地貌	X ₁ : 高程/m	武汉市高程
		X ₂ : 坡度/(°)	武汉市坡度
		X ₃ : 坡向	武汉市坡向
X ₄ : 地貌类型		武汉市地貌类型	
气候状况	X ₅ : 气温/°C	年均气温	
	X ₆ : 降水量/mm	年均降水量	
土壤性质	X ₇ : 土壤类型	武汉市土壤类型	
社会系统	人口分布	X ₈ : 人口密度/(人 km ⁻²)	人口分布
经济系统	经济水平	X ₉ : GDP/(万元 km ⁻²)	GDP 分布
		X ₁₀ : 夜间灯光亮度	夜间灯光亮度分布
		X ₁₁ : 固定资产投资/亿元	各区固定资产投资额

参考 CAO F 等^[28]对各驱动因子离散化分类的方法, 结合区域的实际状况, 其中高程、气温、降水量、人口密度、GDP、夜间灯光亮度、固定资产投资利用自然间断法分为 6 类, 坡度、坡向采用等间距法分别分为 6 类、9 类, 地貌类型参照《中华人民共和国地貌图集 (1:100 万)》分为 7 类, 土壤类型参照《1: 100 万中华人民共和国土壤图》分为 9 类。借助 GIS 软件, 对武汉市进行规则格网分区, 兼顾采样点密度与模型计算效率, 将格网大小设为 2km×2km, 对每个格网中心进行采样, 共计 2144 个采样点。将各年份土地利用类型及相应的因子值提取到采样点, 然后利用地理探测器进行计算, 得到各因子对武汉市土地利用变化的影响强度与交互作用机制。

3.4.1 因子探测结果

因子探测结果反映了各因子对武汉市土地利用变化解释力的大小, 各年份因子探测结果见图 4, 从中分析可知: 2000 年各因子对武汉市土地利用变化解释力由大到小排序为: GDP>夜间灯光亮度>人口密度>土壤类型>降水量>气温>地貌类型>坡向>高程>坡度; 其中解释力较强 (q 值大于 0.1) 的因子分别为 X_8 (人口密度)、 X_9 (GDP)、 X_{10} (夜间灯光亮度), 人口密度反映了区域人口聚集的程度, 对土地利用变化具有重要的影响, 而 GDP 与夜间灯光亮度则体现了地方经济发展水平, 说明 2000 年武汉市土地利用变化主要受到人口与经济的影响。2005 年各因子对武汉市土地利用变化解释力由大到小排序为: GDP>人口密度>夜间灯光亮度>土壤类型>降水量>地貌类型>气温>高程>坡向>坡度; 其中解释力较强的因子有 X_7 (土壤类型)、 X_8 (人口密度)、 X_9 (GDP)、 X_{10} (夜间的灯光亮度), 相比 2000 年, 土壤类型对于土地利用变化的影响有所加强, 土壤类型反映了局部土壤的性质, 对于农作物生长及耕作的适宜性有较大的意义, 可以看出该时期土地利用变化已经转变为多因素主导的情形。2010 年各因子对武汉市土地利用变化解释力由大到小排序为: 土壤类型>夜间灯光亮度>人口密度>固定资产投资>降水量>地貌类型>GDP>气温>高程>坡向>坡度; 但该时期解释力 q 值均小于 0.1, 说明该时期武汉市土地利用变化不受个别因素的主导。2015 年各因子对武汉市土地利用变化解释力由大到小排序为: 夜间灯光亮度>降水量>气温>固定资产投资>GDP>高程>人口密度>土壤类型>地貌类型>坡向>坡度; 其中解释力较强的因子有 X_5 (气温)、 X_6 (降水量)、 X_9 (GDP)、 X_{10} (夜间灯光亮度)、 X_{11} (固定资产投资), 相比 2000—2010 年, 气候因子对土地利用变化的影响比较突出, 气候对于植被及农作物的生长具有重要的影响, 直接影响着土地利用变化的进程。

纵观整个研究期, 不同时期武汉市土地利用变化的影响因素作用强度不尽相同, 但是 GDP、夜间灯光亮度、固定资产投资等因素在研究期内均具有较强的解释力, 由于武汉市是中部中心城市, 地理位置优越, 经济发展迅速, 经济条件在很大程度上直接决定着土地利用的变化格局。

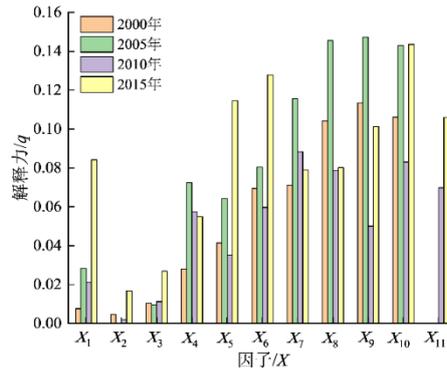


图4 因子探测结果

Fig. 4 Results of factor detection

注：2000年除坡度、坡向、地貌类型外，其余因子均通过5%水平的假设性检验；2005年除坡度、坡向外，其余因子均通过5%水平的假设性检验；2010年、2015年除坡度外，其余因子均通过5%水平的假设性检验

3.4.2 交互探测结果

交互探测体现因子之间的共同作用相对于单因子作用时对土地利用变化的影响差异，各年份交互探测结果如图 5 所示；从中可以看出，各年份的驱动因子间交互探测结果均表现为双因子增强或非线性增强作用，不存在相互独立或减弱的情况，说明因子间交互作用对土地利用变化的解释力相对于单因子作用均有不同程度的增强，同时也印证了土地利用变化是一种复杂的因子交互作用的过程；2000 年降水量与 GDP、夜间灯光亮度交互作用解释力分别为 0.17、0.16，土壤类型与人口密度、GDP、夜间灯光亮度交互作用解释力均为 0.16，人口密度与夜间灯光亮度、GDP 与夜间灯光亮度交互作用解释力均为 0.16，说明在这一时期，土壤类型、人口密度、GDP 等因素共同推动了土地利用的变化；2005 年高程与 GDP 交互作用解释力为 0.21，土壤类型与人口密度、GDP 交互作用解释力分别为 0.20、0.21，土壤类型与人口密度、GDP、夜间灯光亮度交互作用解释力分别为 0.23、0.22、0.23，反映了随着时间的推移，高程、土壤类型、人口密度、GDP 逐渐成为制约土地利用变化的主要因素；2010 年降水量与夜间灯光亮度二者交互作用对土地利用变化解释力最大，其 q 值为 0.15，土壤类型与人口密度、夜间灯光亮度交互作用解释力均为 0.14，夜间灯光亮度与固定资产投资交互作用解释力为 0.14，表明该时期降水量、土壤类型、人口密度、固定资产投资共同主导了土地利用的变化；2015 年高程与降水量、夜间灯光亮度的交互作用解释力为 0.20、0.22，坡向与夜间灯光亮度的交互作用解释力为 0.21，气温与夜间灯光亮度的交互作用解释力为 0.21，降水量与夜间灯光亮度交互作用解释力为 0.21，土壤类型与夜间灯光亮度交互作用解释力为 0.21，夜间灯光亮度与固定资产投资交互作用解释力为 0.22，说明在此时期高程、坡向、气温、降水量、土壤类型、固定资产投资成为主导土地利用变化的关键因素。

从整个研究期来看，不同年份导致土地利用变化的因子交互作用机制差异明显，但土壤类型、人口密度、GDP、夜间灯光亮度与其它因子交互作用均表现出较强的解释力，说明这些因子在各个时期对土地利用变化的作用比较活跃。

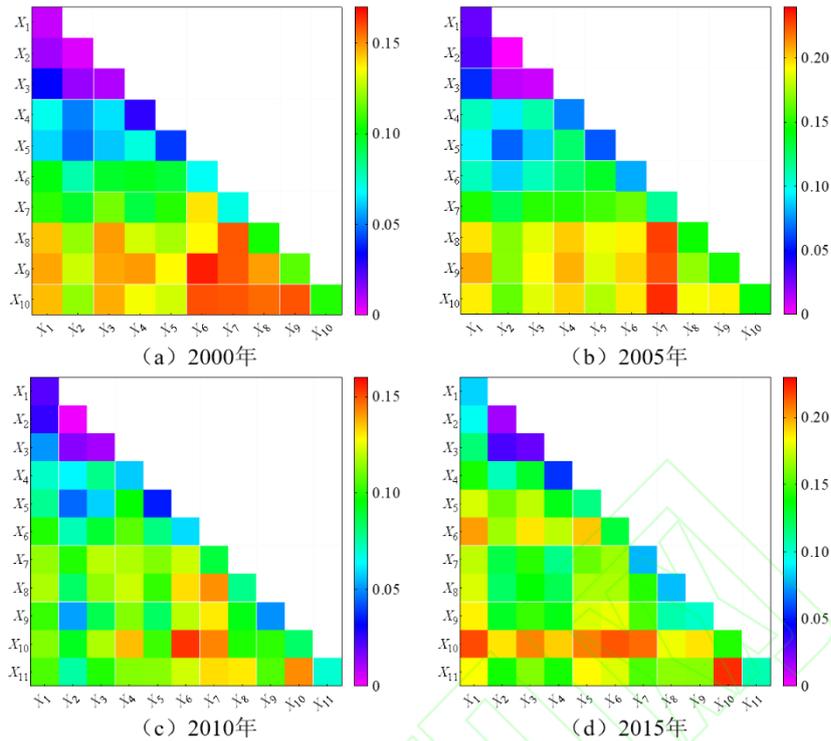


图5 交互探测结果

Fig. 5 Results of interaction detection

4 讨论

本文首先从土地利用结构变化、土地利用动态度、土地利用转移状况三个方面系统分析了武汉市土地利用变化的特征；土地利用结构变化方面，除水域面积为单调减少与建设用地面积单调增加之外，其余各土地利用类型的面积均有增有减，呈现出不同幅度的波动变化；土地利用动态度方面，水域动态度均为负值，而建设用地动态度均为正值，进一步验证了水域、建设用地分别单调较少、增加的结论；土地利用类型转移方面，水域主要转化为耕地，而建设用地的扩张则是以牺牲部分水域与耕地为代价的，说明随着时间的推移，武汉市人地矛盾日渐加深，城市出现盲目无序扩张的现象。然后利用地理探测器分析了武汉市土地利用变化的驱动力，结果发现人口密度、GDP、夜间灯光亮度、固定资产投资始终是影响武汉市土地利用变化的重要因素，而气候因素在后期的影响加深；同时，各年份因子间交互作用均表现为双因子或非线性增强，说明因子间交互作用相对于单因子有所增强，进一步促进了土地利用的变化。相比以往的研究^[15-16]，本文选取的因子更为全面，首次将反映社会经济的夜间灯光亮度考虑进来，有助于系统地认识土地利用变化的驱动力；同时，地理探测器在解释地理现象的空间异质性方面是其它方法所不具备的^[17-18]，具有独特的优势；最后，本文不仅从单因子方面阐述了各因子对土地利用变化的影响强度，并且从因子交互作用的角度进一步探讨了土地利用变化的机制，弥补了常规方法无法解释交互作用影响机制的短板^[14,19]，并且消除了因子之间共线性的影响，对于全面认识土地利用变化的过程具有一定的现实意义。地理探测器适用于因变量为连续量，而自变量为类型量案例的探讨，需要将连续型的自变量进行离散化分类处理，并且该方法也存在一定的局限性：无法解释各因子对土地利用变化的影

响是正向还是负向,并且自变量的离散化策略、格网密度及采样点的数量均会对结果造成影响,这些问题仍有待进一步探究,下一步考虑将地理探测器与传统方法进行集成,充分发挥各自方法的优势。

5 结论

文章首先利用支持向量机对土地利用进行分类,然后在此基础上探讨了武汉市 2000—2019 年土地利用结构、动态变化及转移特征,最后利用地理探测器定量探讨了研究期内武汉市土地利用变化背后的驱动因素,得到了以下结论:

(1) 研究期内,武汉市水域面积呈现单调下降的趋势,而建设用地则表现为单调增加的趋势;草地面积出现“剧烈减少—微弱增加”的现象,而耕地面积总体表现为“剧烈增加—微弱减少”的趋势;林地面积总体表现为“急剧减少—缓慢增加—稳定”的局面,未利用地呈现“大幅增加—缓慢减少—稳定”的状态;

(2) 各时期导致武汉市土地利用变化的驱动因素解释力不尽相同,但是人口密度、GDP、夜间灯光亮度、固定资产投资始终是影响土地利用变化的重要因素,而气候因素在后期的影响比较强烈;交互探测表明各时期因子间交互作用均表现为双因子增强或非线性增强,因子间交互作用对土地利用变化的解释力始终大于单因子作用,从而进一步加深了土地利用的变化。

参考文献:

[1] 刘纪远,张增祥,庄大方,等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 1-12.

LIU Jiyuan, ZHANG Zengxiang, ZHUANG Dafang, et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s[J]. Geographical Research, 2003, 22(1): 1-12.

[2] 李秀彬. 土地利用变化的解释[J]. 地理科学进展, 2002, 21(3): 195-203.

LI Xiubin. Explanation of land use changes[J]. Progress in Geography, 2002, 21(3): 195-203.

[3] 史洪超. 土地利用/覆被变化(LUCC)研究进展综述[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(26): 13107-13110.

SHI Hongchao. A review of land use and land cover change[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(26): 13107-13110.

[4] 张瑞,刘国祥,李涛,等. 基于高分辨率TerraSAR-X影像的城市土地利用变化检测[J]. 铁道勘察, 2011, 37(4): 17-21.

ZHANG Rui, LIU Guoxiang, LI Tao, et al. Detection of urban land use changes based on high resolution TerraSAR-X images[J]. Railway Investigation and Surveying, 2011, 37(4): 17-21.

[5] Netzel P, Stepinski T F. Pattern-based assessment of land cover change on continental scale with application to NLCD 2001–2006[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(4): 1773-1781.

[6] ZHANG Q, LUO G, LI L, et al. An analysis of oasis evolution based on land use and land cover change: A case study in the Sangong River Basin on

- the northern slope of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(2): 223-239.
- [7] REN Y, DENG L, ZUO S, et al. Geographical modeling of spatial interaction between human activity and forest connectivity in an urban landscape of southeast China[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1741-1758.
- [8] 徐广才, 康慕谊, 李亚飞. 锡林郭勒盟土地利用变化及驱动力分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 690-697.
- XU Guangcai, KANG Muyi, LI Yafei. Analysis of land use change and its driving force in Xilingol league[J]. *Resources Science*, 2011, 33(4): 690-697.
- [9] Lu J, Dong Z, Hu G, et al. Land use and land cover change and its driving forces in Maqu County, China in the past 25 years[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2016, 8(5): 432-440.
- [10] 吕婷婷, 李林森, 朱世峰, 等. 近30 a来白洋淀土地利用变化规律及驱动力分析[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(3): 37-44.
- LV Tingting, LI Linsen, ZHU Shifeng, et al. Analysis on land use variation law and its driving force of Baiyangdian Lake since recent 30 years[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(3): 37-44.
- [11] 张修芳, 牛叔文, 冯骁, 等. 天水城市扩张的时空特征及动因分析[J]. *地理研究*, 2013, 32(12): 2312-2323.
- ZHANG Xiufang, NIU Shuwen, FENG Xiao, et al. Spatial-temporal characteristics and driving factors of urban land expansion of a valley city: A case study of Tianshui City in western China[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(12): 2312-2323.
- [12] 满苏尔·沙比提, 马国飞, 张雪琪. 托木尔峰国家级自然保护区土地利用/覆被变化及驱动力分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1241-1248.
- MANSUR Sabit, MA Guofei, ZHANG Xueqi. Analysis of land use/cover change and its driving force in Tomur National Nature Reserve[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1241-1248.
- [13] YU Y, GUO Z, WANG Y C. Spatial patterns and driving forces of land change in Tibetan-inhabited Three Rivers Headwaters region, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(1): 207-225.
- [14] 李丽国, 王宇欣, 邱硕, 等. 乌鲁木齐市土地利用和覆被生态变化及其驱动力分析[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(6): 177-188.
- LI Ligu, WANG Yuxin, QIU Shuo, et al. Research on land-use and land-cover change of Urumqi City and its driving mechanism[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(6): 177-188.
- [15] 常小燕, 李新举, 刁海亭. 采煤塌陷区景观格局演变的驱动力分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(2), 169-178.
- CHANG Xiaoyan, LI Xinju, DIAO Haiting. Analysis of the driving forces of the landscape pattern evolution in a coal-mining subsided area[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 169-178.
- [16] BU C, ZHANG P, WANG C, et al. Spatial distribution of biological soil crusts on the slope of the Chinese Loess Plateau based on canonical correspondence analysis[J]. *Catena*, 2016, 137: 373-381.
- [17] 徐小明, 戴子扬, 闫瑾, 等. 基于RDA的县域土地利用/覆被变化驱动力研究[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(4): 881-887.

- XU Xiaoming, DAI Ziyang, YAN Jin, et al. Investigation on the driving forces of land use/cover change at a county scale based on redundancy analysis[J]. Journal of Shanxi University(Natural Science Edition), 2017, 40(4): 881-887.
- [18] THAPA R B, MURAYAMA Y. Drivers of urban growth in the Kathmandu valley, Nepal: Examining the efficacy of the analytic hierarchy process[J]. Applied Geography, 2010, 30(1): 70-83.
- [19] 位欣, 刘耀林, 姚鹏. 基于模拟退火遗传算法的土地利用变化驱动力研究[J]. 中国土地科学, 2008, 22(7): 34-37.
- WEI Xin, LIU Yaolin, YAO Peng. Study on driving forces of land use change based on simulated annealing genetic algorithm[J]. China Land Science, 2008, 22(7): 34-37.
- [20] 杨建新, 龚健, 高静, 等. 国家中心城市土地利用变化稳定性和系统性特征——以武汉市为例[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 701-716.
- YANG Jianxin, GONG Jian, GAO Jing, et al. Stationary and systematic characteristics of land use and land cover change in the national central cities of China using intensity analysis: A case study of Wuhan City[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 701-716.
- [21] 徐新良. 土地利用/覆被变化时空信息分析方法及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2014.
- XU Xinliang. Spatial-temporal pattern analysis of land use/cover change: Methods and applications [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 2014.
- [22] 王冬辰, 杜培军, 苏红军, 等. 近20年大同市土地利用/覆盖遥感变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 68-75.
- WANG Dongchen, DU Peijun, SU Hongjun, et al. Land use / land cover changes in Datong based on remote sensing data[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 68-75.
- [23] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 83-89.
- WANG Xulan, BAO Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 83-89.
- [24] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.
- ZHU Huiyi, LI Xiubin. Discussion on the index method of regional land use change[J]. Acta Geographical Sinica, 2003, 58(5): 643-650.
- [25] 谭远模, 谢思梅, 谢荣安. 土地利用时空变化与城市化发展分析[J]. 测绘通报, 2020, (4): 139-142+146.
- TAN Yuanmo, XIE Simei, XIE Rongan. Analysis of spatial and temporal change of land use and urbanization development[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020, (4): 139-142+146.
- [26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographical Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [27] WANG J, ZHANG T, FU B. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.
- [28] CAO F, GE Y, WANG J. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment[J]. GIScience & Remote Sensing, 2013, 50(1): 78-92.