doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.019

耕地利用转型碳排放时空分异特征与形成机理研究

盖兆雪　詹汶羲　王洪彦　杜国明

（东北农业大学公共管理与法学院，哈尔滨 150030）

摘要：为揭示耕地利用转型的碳排放时空分异特征，以松花江流域哈尔滨段为例，基于网格单元法和碳排放系数，测度1990—2020年耕地利用转型的碳排放强度，并借助重心分析、探索性空间数据分析、冷热点分析工具和地理探测器等研究方法揭示耕地利用转型的碳排放空间异质性与形成机理。结果表明：1990—2020年耕地面积呈下降趋势，耕地与建设用地、林地之间的转型最为剧烈，耕地主要转型为建设用地。1990—2020年耕地利用转型碳排放量呈上升趋势，由1990—2000年的3 704.12 t增加到2010—2020年的35 656.29 t，增加了近8.63倍，耕地利用转型碳排放最终呈现为碳源形式。1990—2020年耕地利用转型碳排放重心基本保持稳定，向东移动了15.17 km，其中1990—2010年重心移动距离最大，呈现东北地区碳排放恶化，而西南地区碳排放明显改善的特点。1990—2020年耕地利用转型碳排放非随机分布，具有较强的空间集聚性，热点区主要围绕南岗区向周围边界扩散，冷点区零星点状分布在东南部地区。与城镇中心距离是耕地利用转型碳排放的主控因子，各因子之间交互作用以双因子增强为主，其中土地利用程度与年平均降水量、与城镇中心距离之间的相互作用解释力较强，耕地利用转型碳排放空间分异特征是多因子共同作用的结果。

关键词：耕地利用转型；碳排放；时空分异；形成机理；地理探测器；松花江流域哈尔滨段

中图分类号：F301.2；X24　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2022)07-0187-10　　**OSID**：

Spatio-temporal Differentiation Characteristics and Formation Mechanism of Carbon Emission from Cultivated Land Use Transformation

GAI Zhaoxue　ZHAN Wenxi　WANG Hongyan　DU Guoming

(*School of Public Administration and Law*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to reveal the temporal and spatial differentiation characteristics of carbon emissions from cultivated land use transition, taking Harbin section of Songhua River Basin as an example, the carbon emission intensity of cultivated land use transition from 1990 to 2020 was measured based on the grid element method and carbon emission coefficient. In addition, the means of gravity center analysis, exploratory spatial data analysis, cold and hot spot analysis tools and geodetector were implemented to reveal the spatial heterogeneity and formation mechanism of carbon emissions from cultivated land use transition. The results showed that the cultivated land area demonstrated a downward trend in 1990—2020, and the conversion between cultivated land and construction land, forest land was the most dramatic, and cultivated land mainly converted into construction land. The carbon emission of cultivated land use transformation showed an upward trend in 1990—2020, from 3 704.12 t in 1990—2000 to 35 656.29 t in 2010—2020 with an increase of nearly 8.63 times. The carbon emission of cultivated land use transformation eventually appeared as a carbon source. From 1990 to 2020, the carbon emission center of arable land use transformation remained basically stable, moving 15.17 km to the east, of which the center of gravity moved the longest from 1990 to 2010. Overall the carbon emissions in the northeast region continue to deteriorate, while the carbon emissions in the southwest region were improved significantly. In 1990—2020, the carbon emissions from cultivated land use transformation were non randomly distributed, but had strong spatial agglomeration. The hot spots mainly spread around Nangang

收稿日期：2021-08-08　修回日期：2021-10-21

基金项目：国家自然科学基金项目(41461040)、黑龙江省自然科学基金项目(LH2019D012)和东农学者计划项目(19QC37)

作者简介：盖兆雪(1990—)，女，讲师，博士，主要从事土地/耕地资源优化配置研究，E-mail：gaizhaoxue@163.com

通信作者：杜国明(1978—)，男，教授，博士，主要从事土地资源优化配置和农村发展研究，E-mail：nmgdgm@126.com

District to the surrounding boundary, and the cold spots were scattered in the southeast. Urban center distance was the main factor of carbon emission for cultivated land use transformation, and the interaction between various factors was mainly enhanced by two factors. Among them, the interaction between land use degree, and annual average precipitation, urban center distance had strong explanatory power. The spatial differentiation characteristics of carbon emission for cultivated land use transformation were the result of multi-factor interaction.

Key words: cultivated land use transformation; carbon emissions; spatio-temporal differentiation; formation mechanism; geographic detectors; Harbin section of Songhua River Basin

0 引言

耕地是人类赖以生存与发展的宝贵资源,是保障国家粮食安全和治国安邦的根本条件[1]。近年来,随着工业化、城镇化的快速发展,各类用地通过竞争相互消长,导致城乡空间布局和城乡地域形态等迅速转变,乡村要素快速流动引发了耕地边际化、非农化和破碎化等问题日益明显;同时耕地转变为其他用地类型,耕地的数量和空间结构发生改变[2]。耕地是碳循环的重要环节,耕地利用转型不可避免地改变碳排放规模[3-4]。耕地在转型过程中既会增加植被、土壤和水域的固碳能力,又会释放出大量碳,进而导致气候异常引发全球变暖,威胁人类的生存和发展[5]。当前中国正处于乡村振兴战略初期以及城镇化、工业化加速阶段,耕地利用和生态环境问题愈加显著。因此,探究耕地利用转型过程中的碳排放强度及时空分异特征,对促进社会经济低碳转型和可持续发展具有重要意义。

耕地利用转型是由土地利用转型拓展而来,可分为理论研究和应用研究两方面,前者主要包括耕地利用转型概念与内涵[6-7]、理论研究框架[8]、转型机理[9]和转型路径[10]等方面;后者主要包括耕地利用转型的时空分异特征[11]、耦合关系[12-13]以及转型效应[14]等研究。碳排放立足于从微观—中观—宏观尺度研究土地利用碳排放效应,在微观尺度上,基于土壤碳和植被碳计算土地利用变化的碳通量[15];在中观尺度上,研究土地利用变化碳排放的时空特征[16]、影响因素[17]和碳排放动态模拟[18]等方面;继而从宏观尺度提出土地利用减排政策和碳补偿办法[19]。综合来看,一是已有研究侧重挖掘土地利用面积变化的碳排放问题,而耕地利用转型对碳源、碳汇的影响研究尚未涉及;二是缺乏对耕地利用转型的碳排放影响因素研究。因此,本文基于1990、2000、2010、2020 年 4 期土地利用数据,采用单元网格法和碳排放系数分析 1990—2020 年研究区耕地利用转型碳排放强度,结合重心分析、探索性空间数据分析和冷热点分析工具揭示耕地利用转型碳排放的空间格局演变规律和趋势,并借助地理探测器模型探索耕地利用转型碳排放的形成机理,以期为缓解生态环境恶化和完善耕地保护政策提供参考。

1 研究区概况

松花江流域哈尔滨段位于 125°42′~130°10′E,44°04′~46°40′N(图 1),地处松嫩平原,位于黑龙江省南部,是黑龙江省重要的粮食生产基地,是东北城镇化进程和资源环境变化较快的典型区域,同时也是“东北振兴”和“一带一路”战略的重要地区。研究区土地利用类型多样,土地面积 706 913.32 hm^2。耕地面积比重较大,2020 年耕地面积为 421 697.41 hm^2,年平均气温为 5.34℃,冬夏最大温差 77.10℃,年均日照时数 2 180.80 h,降水主要集中在 6—9 月,占全年的 70%[20]。据相关研究表明,研究区城镇化进程快、土地开发强度大、耕地非农化现象明显[20]。

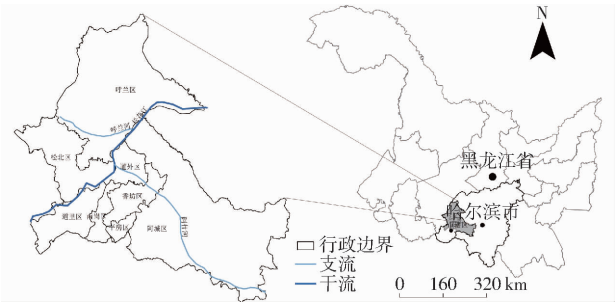

图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

2 数据来源及处理

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn),空间分辨率为 30 m,根据土地利用现状分类标准,参照前人的研究[20]以及地理特征,将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。利用 ENVI 软件进行波段融合、几何校正、图像增强、镶嵌、裁剪等预处理,同时根据野外实地调查对其进行人工修正,获得 1990、2000、2010、2020 年 4 期土地利用数据,最终建立 1990—2020 年 4 期土地利用数

据库。

耕地利用转型碳排放是自然条件和社会经济条件共同作用的结果，需综合考虑自然条件和社会经济因素，并兼顾指标选取的难易程度。因此，结合研究区实际情况，分别从自然、距离和社会经济 3 方面选取影响因子，自然因子包括地形地貌因子和气候因子，具体包含坡度 X_1、地形起伏度 X_2、高程 X_3、年平均降水量 X_4、年平均气温 X_5，其中坡度、地形起伏度和高程决定着土地利用类型的分布格局，坡度小、地形起伏度小、高程低的地带，耕地极易与其他类型土地发生转型。气温、降水条件决定着耕地、林地的地理分布和生产水平，是碳排放变化最敏感的因子。距离因子包括与城镇中心距离 X_6、与乡级以上道路距离 X_7、与水域距离 X_8，与城镇中心距离越近，耕地越容易发生转型，与乡级以上道路、水域距离越近耕地发生转型的机率也增加，如为运输方便占用耕地而修建工业用地；为完善农田基础设施，离水域越近的耕地易发生转型。社会经济因子包括地均 GDP X_9、人口密度 X_{10} 和土地利用程度 X_{11}，表征人类活动对耕地利用转型的干扰程度。具体指标见表 1。

表 1　形成机理指标体系

Tab. 1　Index system of formation mechanism analysis

一级指标	二级指标	具体指标	数据来源	计算方法
自然条件	地形地貌因子	坡度 X_1	DEM 数据源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn）	基于 DEM 数据，运用 ArcGIS 10.2 软件提取坡度
		地形起伏度 X_2		基于 DEM 数据，运用 ArcGIS 10.2 软件提取地形起伏度
		高程 X_3		运用 ArcGIS 10.2 软件，按照自然断点法重新调整 DEM 分级
	气候因子	年平均降水量 X_4	中国气象科学数据服务网（http://data.cma.gov.cn）	将不同年份的日降水数据计算为月和年数据，根据气象站点数据进行属性赋值，利用 ArcGIS 10.2 软件中的 Kriging 空间插值法生成栅格数据
		年平均气温 X_5		
距离条件	距离因子	与城镇中心距离 X_6	城镇中心点数据源于国家基础地理信息中心（NGCC）（http://ngcc.sbsm.gov.cn/）	运用 ArcGIS 10.2 软件中的欧氏距离工具获得目标的距离矢量图
		与乡级以上道路距离 X_7	交通数据源于国家基础地理信息中心（NGCC）（http://ngcc.sbsm.gov.cn/）	
		与水域距离 X_8	中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）	
社会经济	社会经济因子	地均 GDP X_9	《哈尔滨市统计年鉴》（http://www.harbin.gov.cn/）	利用 ArcGIS 10.2 软件中的反距离加权插值法对各个区的地均 GDP 数据进行空间化[21-24]
		人口密度 X_{10}		
		土地利用程度 X_{11}	中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）	基于土地利用程度测度模型[25]，利用 ArcGIS 10.2 软件分别统计不同单元土地利用样本中的不同土地利用类型

3　研究方法

3.1　网格单元法

网格单元法可定量刻画土地利用转型碳排放时空的精细演变过程[26]。利用 ArcGIS 10.2 软件，以正方形等积规则网格划分样本区域，综合研究区面积、研究目的和计算机运算效率，经反复调试，以 900 m×900 m 的正方形网格为研究单元，获得 9 180 个网格单元，并将所需研究数据转入到对应的网格单元中。

3.2　碳排放测算

根据研究区土地利用类型，将耕地利用转型分为耕地转为林地、草地、水域、建设用地和未利用地 5 种类型。其中林地、草地、水域和未利用地作为碳汇，耕地、建设用地作为碳源。耕地利用转型为相互转型，需测算相互转型的碳排放量，碳排放测算公式为

$$E = \sum e_i = \sum T_i \delta_i \tag{1}$$

式中　E——碳总排放量

e_i——耕地与其他土地利用类型相互转型对应产生的碳排放量

T_i——耕地与其他土地利用类型相互转型对应变化的土地面积

δ_i——耕地与其他土地利用类型相互转型对应的碳排放系数

耕地碳排放系数的确定需要同时考虑碳排放和碳吸收两方面（既产生 CH_4，又吸收 CO_2），CAI 等[27]研究表明，农作物碳排放系数为 0.504 t/hm^2；何勇等[28]研究表明，农作物碳吸收系数为 0.007 t/hm^2，由此得耕地净碳排放系数为 0.497 t/hm^2。林地、草地的碳排放系数均来源于方精云等[29]的研究成果，

中国森林碳汇效率的加权平均值为 -0.581 t/hm^2，草地排放系数为 -0.021 t/hm^2，考虑研究区的植被覆盖和气候情况，采用这一平均碳汇系数具有一定的合理性。水域碳排放系数也需要考虑碳源和碳汇两方面（积水情况下是 CO_2 的汇，被排干围垦后是 CO_2 的源），赖力[30]的研究表明，中国水域的平均碳汇系数为 -0.257 t/hm^2，采取这一系数作为研究区水域碳排放系数。建设用地的碳排放系数既要考虑土壤的碳排放量又要考虑工业生产生活中的能源消耗等活动产生的碳排放，因此本文通过查阅统计年鉴、IPCC 碳排放清单，结合研究区主要能源消耗（煤、石油、天然气）结构和能源碳排放系数，确定建设用地碳排放系数为 0.643 t/hm^2。未利用地具有一定的碳吸收能力，碳排放系数参考相关研究[30]的公认值 -0.005 t/hm^2。

3.3 重心分析

依据重心模型构建耕地利用转型碳排放重心模型[31]，揭示耕地利用转型碳排放演化的空间轨迹。假定某区域由 n 个单元组成，其中，第 i 个子区单元内的中心坐标设定为 (X_i, Y_i)，M_i 代表该区域单元在某种属性特征意义中的数值，该属性中的重心坐标表达式为

$$\begin{cases} X = \sum_{i=1}^{n} (M_i X_i) \Big/ \sum_{i=1}^{n} M_i \\ Y = \sum_{i=1}^{n} (M_i Y_i) \Big/ \sum_{i=1}^{n} M_i \end{cases} \tag{2}$$

式中 X——重心坐标的经度
Y——重心坐标的纬度
X_i——第 i 个网格中心的经度坐标值
Y_i——第 i 个网格中心的纬度坐标值
M_i——第 i 个网格耕地利用转型碳排放量

3.4 冷热点分析

冷热点分析用于确定空间聚集的高（热点）/低（冷点）值区域[32]。通过该方法来反映空间上耕地利用转型碳排放变化的聚类分布。冷热点观测值 G 用于描述冷热分布，如果该指数为具有统计学意义的正值，则值越高热点聚类的分布越集中，该区域为热点区域，反之表明该区域为冷点区域。利用 ArcGIS 10.2 软件中 Getis-Ord General G 工具进行冷热点分析。冷热点分布根据置信区间分为 6 个等级，即在 99%、95% 和 90% 置信区间的冷点与热点分布。计算公式为

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \boldsymbol{W}_{ij} M_i M_j}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} M_i M_j} \quad (i \neq j) \tag{3}$$

式中 M_j——第 j 个网格的耕地利用转型碳排放量
$\boldsymbol{W}_{ij}$——要素 i 和 j 的空间权重矩阵（值为 1 则表示空间相邻，值为 0 则表示不相邻）

3.5 地理探测器模型

地理探测器模型能够定量评估影响研究区耕地利用转型碳排放空间变化的因子及因子的影响强度[33]，计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{4}$$

式中 q——形成机理解释力，值域为[0,1]
L——因子的层数
N_h——第 h 层碳排放和因子对应的单元数
N——全区碳排放和因子对应的单元数
σ_h^2——第 h 层碳排放变化方差
σ^2——全区碳排放变化方差

交互作用探测主要为判断各因子对因变量是独立产生影响的还是相互作用后产生影响，影响的作用力是减弱还是增强，两个因子之间的关系可分为以下几类：①$q(x_1 \cap x_2) < \mathrm{Min}(q(x_1), q(x_2))$，非线性减弱。② $\mathrm{Min}(q(x_1), q(x_2)) < q(x_1 \cap x_2) < \mathrm{Max}(q(x_1), q(x_2))$，单因子非线性减弱。③$q(x_1 \cap x_2) > \mathrm{Max}(q(x_1), q(x_2))$，双因子增强。④$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$，独立。⑤$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$，非线性增强。

4 结果与分析

4.1 耕地利用转型结构演化特征

利用 ArcGIS 10.2 平台的叠加分析工具，分析 1990—2020 年研究区耕地利用转型数量的分布特征及相互转型的流向，揭示耕地利用转型结构演化特征。1990—2000 年耕地转出面积为 3 806.73 hm^2，其中耕地转为水域的面积最大，贡献率为 36.48%；其次是转为建设用地，贡献率为 33.76%；另外，22.39% 的耕地由于撂荒转为未利用地。然而，耕地转入面积为 6 721.74 hm^2，其中未利用地转为耕地的面积最大，贡献率为 40.14%；其次是草地、林地，贡献率分别为 34.57%、19.46%。综合来看，由于转入量大于转出量，1990—2000 年耕地面积呈上升趋势，增加了 2 915.01 hm^2，主要源于未利用地和草地的转入（表 2）。

2000—2010 年耕地转型为其他类型土地的面积为 44 131.50 hm^2，其中转为建设用地的面积最大，为 21 381.48 hm^2，贡献率为 48.45%；转为林地、草地、水域和未利用地的面积相差不大，贡献率在

表 2　1990—2000 年耕地利用转型结果

Tab. 2　Transformation of utilization of cultivated land in 1990—2000

类型	其他类型转型为耕地		耕地转型为其他类型		转型净面积/hm^2
	转型面积/hm^2	贡献率/%	转型面积/hm^2	贡献率/%	
林地	1 307.97	19.46	171.36	4.51	1 136.61
草地	2 323.62	34.57	108.90	2.86	2 214.72
水域	390.06	5.80	1 388.79	36.48	-998.73
建设用地	1.98	0.03	1 285.29	33.76	-1 283.31
未利用地	2 698.11	40.14	852.39	22.39	1 845.72
总计	6 721.74	100	3 806.73	100	2 915.01

10% ~16%之间。然而,其他类型土地转为耕地的面积仅为 27 506.61 hm^2,主要来自建设用地(41.13%)和林地(24.75%)的转入;其次为未利用地(17.45%)和草地(11.21%)的转入。整体而言,由于转出量大于转入量,2000—2010 年耕地面积呈下降趋势,减少了 16 624.89 hm^2,主要流向建设用地和林地,可见耕地与建设用地、林地之间的转型较为活跃(表 3)。

表 3　2000—2010 年耕地利用转型结果

Tab. 3　Transformation of utilization of cultivated land in 2000—2010

类型	其他类型转型为耕地		耕地转型为其他类型		转型净面积/hm^2
	转型面积/hm^2	贡献率/%	转型面积/hm^2	贡献率/%	
林地	6 808.86	24.75	6 985.62	15.83	-176.76
草地	3 083.58	11.21	5 555.97	12.59	-2 472.39
水域	1 501.83	5.46	5 750.73	13.03	-4 248.90
建设用地	11 313.09	41.13	21 381.48	48.45	-10 068.39
未利用地	4 799.25	17.45	4 457.70	10.10	341.55
总计	27 506.61	100	44 131.50	100	-16 624.89

2010—2020 年耕地转为其他类型土地的面积为 58 097.62 hm^2,其中耕地转为建设用地的面积最大,达到 36 434.47 hm^2,贡献率为 62.71%;其次是转为林地和草地,贡献率分别为 16.65%、15.35%。而其他类型转为耕地的面积为 37 872.87 hm^2,其中 8 373.24 hm^2 的建设用地、8 695.29 hm^2 的水域、7 776.92 hm^2 的林地转为耕地,贡献率分别为 22.11%、22.96%、20.53%,可见,水域转为耕地的面积最大。总体来看,由于转入量小于转出量,耕地面积呈下降趋势,减少了 20 224.75 hm^2,耕地主要转为建设用地(表 4)。

4.2　耕地利用转型碳排放时间变化特征

1990—2000 年研究区耕地利用转型碳排放量

表 4　2010—2020 年耕地利用转型结果

Tab. 4　Transformation of utilization of cultivated land in 2010—2020

类型	其他类型转型为耕地		耕地转型为其他类型		转型净面积/hm^2
	转型面积/hm^2	贡献率/%	转型面积/hm^2	贡献率/%	
林地	7 776.92	20.53	9 666.31	16.65	-1 889.39
草地	6 628.04	17.50	8 920.71	15.35	-2 292.67
水域	8 695.29	22.96	3 075.57	5.29	5 619.72
建设用地	8 373.24	22.11	36 434.47	62.71	-28 061.23
未利用地	6 399.38	16.90	0.56	0	6 398.82
总计	37 872.87	100	58 097.62	100	-20 224.75

为 3 704.12 t,此阶段转型过程中碳排放量大于碳吸收量,导致耕地利用转型碳排放最终呈现为碳源形式。其中耕地与未利用地之间相互转型所产生的碳源最大,碳排放量为 1 336.70 t;其次是与草地之间的转型,碳排放量为 1 152.55 t。而耕地与水域之间的转型最终以碳汇形式展现,碳排放量为 -163.06 t。2000—2010 年耕地利用转型碳排放量是上一时间段的近 5.87 倍,碳排放量达到 21 743.53 t,主要来自与建设用地之间的转型,碳排放量达到 19 370.90 t,占总碳排放量的 89.09%;而林地、水域与耕地之间的转型产生碳汇,碳排放量分别为 -674.64、-731.53 t。2010—2020 年耕地利用转型碳排放量为 35 656.29 t,是上一时间段的近 1.64,碳源同样主要来自与建设用地之间的相互转型,碳排放量为 27 588.86 t,占总碳排放量的 77.37%;而耕地与林地之间的转型最终形成碳汇,碳排放量为 -1 751.00 t。总体来看,1990—2020 年研究区耕地利用转型碳排放量呈上升趋势,由 1990—2000 年的 3 704.12 t 增加到 2010—2020 年的 35 656.29 t,增加了近 8.63 倍,这与耕地非农化、寂寞化、边际化等有关(表 5)。

4.3　耕地利用转型碳排放空间分异特征

4.3.1　耕地利用转型碳排放重心分析

1990—2020 年研究区耕地利用转型碳排放重心基本保持稳定,向东移动了 15.17 km(图 2)。1990—2020 年耕地利用转型碳排放重心向东迁移,其中 1990—2010 年重心移动距离最大,向东北方向移动了 11.49 km,说明东北地区耕地利用转型碳排放量显著增加,而西南地区耕地利用转型碳排放有所改善。2010—2020 年重心发生改变,向东南方向迁移,但偏移距离不大,仅移动了 3.68 km,可见东南地区碳排放恶化,而西北地区碳排放明显改善。从市辖区来看,松北区耕地利用转型碳排放量在减少,而道外区耕地利用转型碳排放量增加,主要由于

表 5 1990—2020 年耕地利用转型碳排放量

Tab. 5 Carbon emissions from cultivated land use transformation in 1990—2020 t

类型	1990—2000 年			2000—2010 年			2010—2020 年		
	碳汇	碳源	合计	碳汇	碳源	合计	碳汇	碳源	合计
林地	-99.56	650.06	550.50	-4 058.65	3 384.00	-674.64	-5 616.13	3 865.13	-1 751.00
草地	-2.29	1 154.84	1 152.55	-116.68	1 532.54	1 415.86	-187.33	3 294.13	3 106.80
水域	-356.92	193.86	-163.06	-1 477.94	746.41	-731.53	-790.42	4 321.56	3 531.14
建设用地	0	827.43	827.43	0	19 370.90	19 370.90	0	27 588.86	27 588.86
未利用地	-4.26	1 340.96	1 336.70	-22.29	2 385.23	2 362.94	0	3 180.49	3 180.49
总计	-463.03	4 167.15	3 704.12	-5 675.56	27 419.08	21 743.53	-6 593.88	42 250.17	35 656.29

注:正值表示碳排放,负值表示碳吸收。

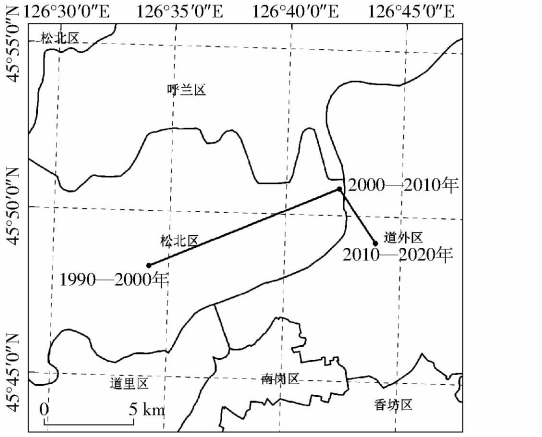

图 2 碳排放重心转移轨迹

Fig. 2 Trajectory of carbon emission center of gravity transfer

大量耕地转为建设用地,导致碳排放量增加。

4.3.2 耕地利用转型碳排放冷热点分析

基于 GeoDa 平台中的全局自相关工具探测研究区耕地利用转型碳排放的空间集聚性,结果如图 3 所示。1990—2000 年、2000—2010 年和 2010—2020 年研究区耕地利用转型碳排放的 Global Moran's I 分别为 0.524、0.507、0.578,并通过 $P<0.001$ 显著性检验。Global Moran's I 整体呈上升趋势,其中 1990—2000 年、2000—2010 年 Global Moran's I 基本保持稳定,略呈下降趋势,减少了 0.017,表明耕地利用转型碳排放空间集聚性略有所下降,但下降幅度可以忽略不计。2000—2010 年和 2010—2020 年 Global Moran's I 变化较为明显,增加了 0.071,说明研究区耕地利用转型碳排放空间集聚性增强。总体来看,研究区耕地利用转型碳排放非随机分布,具有较强的空间集聚性。

为了进一步探测 1990—2020 年耕地利用转型碳排放的空间异质性,利用冷热点分析工具进行研究区耕地利用转型碳排放局部空间自相关分析,以此揭示研究区耕地利用转型碳排放的空间分布格局(图 4)。1990—2000 年耕地利用转型碳排放热点区呈现点状的分布格局,其中道里区、松北区点状热点区较多,表明这些区域碳排放量有所增加;冷点区域零星分布在阿城区,主要由于阿城区林地资源较多,退耕还林政策的实施改善了当地的碳排放量。2000—2010 年耕地利用转型碳排放热点区呈现带状的分布格局,形成以中心区为圆心向四周扩散的趋势,热点区主要围绕南岗区向周围边界扩散,这与研究区国民社会经济发展方向相一致;冷点区仍然分布在东南部地区,但冷点区面积比 1990—2000 年增加,从点状向片状转变。2010—2020 年耕地利用转型碳排放热点区呈增加趋势,出现了点状、带状和片状共存的空间格局,说明耕地利用转型碳排放量进一步增加;而冷点区呈现点状的分布格局,零星分布在研究区的东部和南部。总体来看,1990—2020 年耕地利用转型碳排放的冷热点空间分布格局与社会经济发展趋势、三北防护林工程、退耕还林政策的

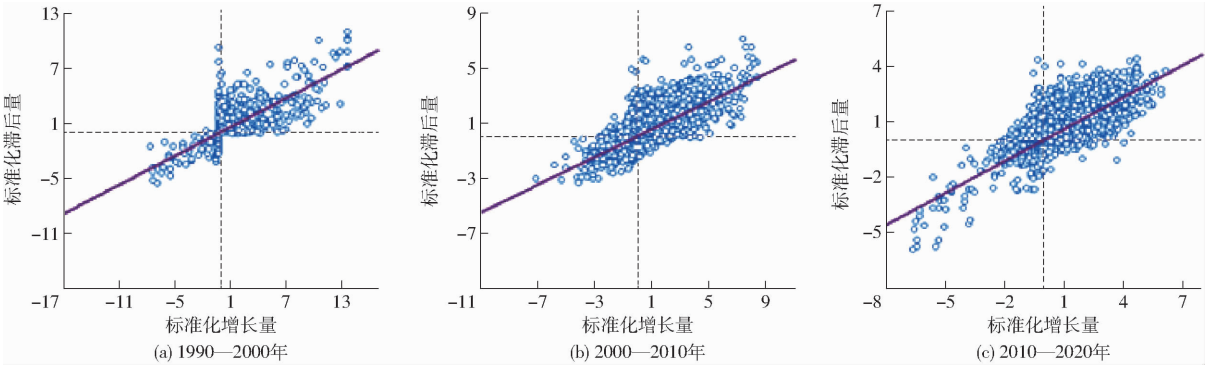

图 3 1990—2020 年耕地利用转型碳排放 Moran 散点图

Fig. 3 Moran scatter charts of carbon emission from cultivated land use transformation in 1990—2020

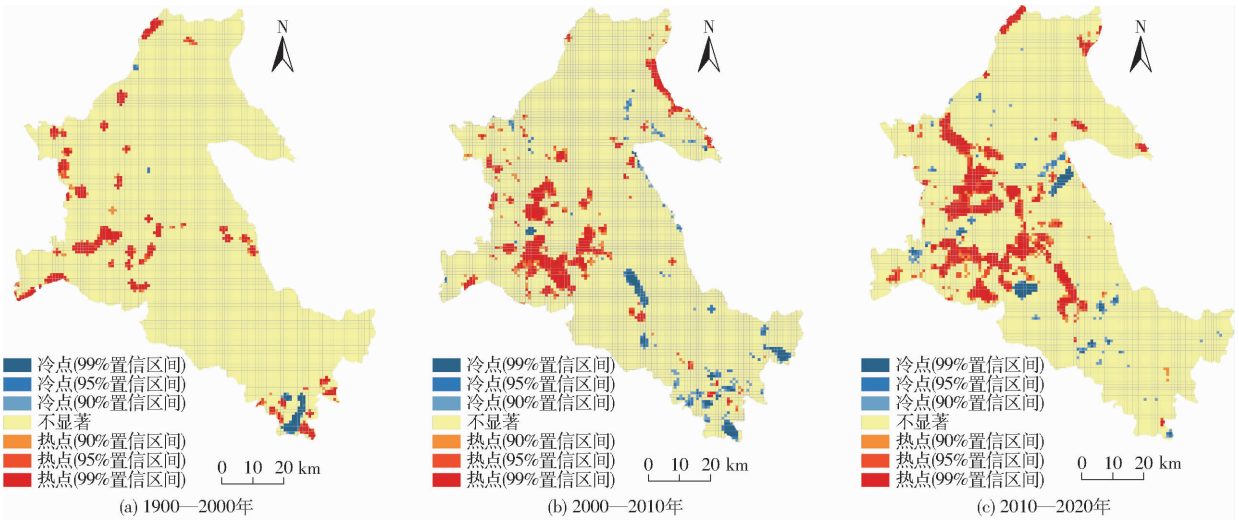

图 4　耕地利用转型碳排放冷热点分布图

Fig. 4　Cold and hot spot distribution diagrams of carbon emission from cultivated land use transformation

实施密不可分。

4.4　耕地利用转型碳排放形成机理

由于不同时期影响因子对耕地利用转型碳排放的影响具有相似性，因此以 2010—2020 年为目标年进行耕地利用转型碳排放形成机理分析。利用地理探测器模型中的因子探测法定量评估影响研究区耕地利用转型碳排放的因子及因子的影响强度（图 5）。2010—2020 年耕地利用转型碳排放的影响因子作用强度从大到小依次为与城镇中心距离（0.107 8）、土地利用程度（0.103 0）、年平均降水量（0.045 7）、高程（0.039 3）、年平均气温（0.033 3）、与乡级以上道路距离（0.029 4）、地均 GDP（0.028 1）、人口密度（0.027 2）、地形起伏度（0.021 0）、坡度（0.018 9）、与水域距离（0.014 1），其中与城镇中心距离是耕地利用转型碳排放的主控因子，土地利用程度也具有较强的解释力；而地形起伏度、坡度、与水域距离对耕地利用转型碳排放的影响强度较低，说明与城镇中心距离、土地利用程度对耕地利用转型的碳排放量有较大的影响。随着研究区城镇化、工业化进程的加快，建设用地的经济收益明显高于耕地的经济收益，耕地在适宜的条件下极易发生转型，同时人类生活及生产活动需求的增加，不断促进耕地非农化，进而导致耕地利用转型碳排放增加。

2010—2020 年耕地利用转型碳排放的空间异质性源于多种因子的共同作用，单一因子并不能完全解释耕地利用转型碳排放的空间分异特征。根据地理探测器模型的交互探测法可知，不同因子之间的相互作用会产生更强的作用效果，其作用方式包括非线性增强和双因子增强两种。耕地利用转型碳排放的影响因子交互作用以双因子增强为主。其中土地利用程度与年平均降水量（0.166 3）的相互作用最大；其次为与城镇中心距离与土地利用程度（0.161 4）、土地利用程度与高程（0.148 7）。其中土地利用程度与年平均降水量（0.166 3）、土地利用程度与高程（0.148 7），因子交互作用呈现非线性增强，而与城镇中心距离与土地利用程度，因子交互作用呈现双因子增强效应，可见社会经济因子与自然因子之间的交互作用以非线性增强为主。总体来看，土地利用程度与其他因子之间的交互作用明显强于其他因子之间的交互作用，土地利用程度是人类活动作用的结果，对耕地利用转型碳排放的影响强度较强，因此土地利用程度与其他因子之间的作用强度最为复杂。社会经济因子与距离因子、自然因子之间的交互作用明显强于内部因子的交互作用，表明耕地利用转型碳排放空间分异特征并不是单独发生作用，而是呈现协同增强的作用效果（表 6）。

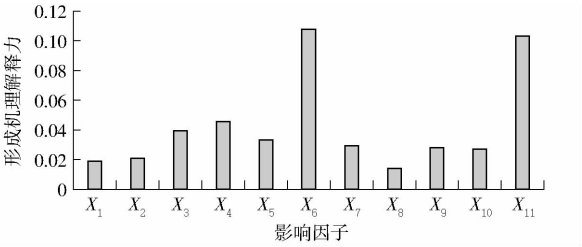

图 5　2010—2020 年影响因子的形成机理解释力

Fig. 5　Explanatory power of formation mechanism of impact factor in 2010—2020

5　讨论

本文利用网格单元法，基于长时间序列土地利用现状数据揭示了耕地利用转型碳排放的时空分异特征，从自然因子、社会经济因子和距离因子 3 方面挖掘耕地利用转型碳排放的影响因子，探测不同因子以及因子之间交互作用的影响强度，探索耕地利

表 6 2010—2020 年各影响因子的交互作用(q 值)

Tab. 6 Interaction of influencing factors in 2010—2020

影响因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1	0.018 9										
X_2	0.022 6 +	0.021 0									
X_3	0.046 1 +	0.048 6 +	0.039 3								
X_4	0.064 8 +	0.065 5 +	0.085 8 *	0.045 7							
X_5	0.050 2 +	0.052 3 +	0.058 8 +	0.071 7 +	0.033 3						
X_6	0.118 1 +	0.116 8 +	0.123 6 +	0.144 1 +	0.132 1 +	0.107 8					
X_7	0.042 7 +	0.044 9 +	0.052 2 +	0.087 2 *	0.053 1 +	0.117 8 +	0.029 4				
X_8	0.036 6 *	0.037 6 *	0.060 1 *	0.069 4 *	0.055 1 *	0.129 6 *	0.041 9 +	0.014 1			
X_9	0.046 5 +	0.048 2 +	0.077 4 *	0.062 6 +	0.055 7 +	0.119 0 +	0.059 6 *	0.050 7 *	0.028 1		
X_{10}	0.044 8 +	0.045 7 +	0.080 0 *	0.063 8 +	0.051 2 +	0.116 4 +	0.064 2 *	0.050 4 *	0.036 2 +	0.027 2	
X_{11}	0.118 6 +	0.117 8 +	0.148 7 *	0.166 3 *	0.119 2 +	0.161 4 +	0.122 0 +	0.123 7 *	0.117 4 +	0.114 0 +	0.103 0

注:* 表示两两因子的交互作用为非线性增强,+ 表示双因子增强。

用转型碳排放空间分布格局的形成机理,在一定程度上为耕地可持续利用奠定了基础。

通过研究发现,1990—2020 年松花江流域哈尔滨段耕地利用转型碳排放量明显增加,归因于研究区耕地利用转型比较频繁,且主要转型为碳排放较高的建设用地。2010—2020 年耕地利用转型最为剧烈,耕地利用转型碳排放量是 1990—2000 年的 9.63 倍,碳源量远大于碳汇量。与城镇中心距离、土地利用程度对耕地利用转型碳排放的影响较强,与城镇中心越近,人类活动越活跃,耕地发生转型的概率就会增加,且极易转为建设用地[34],进而导致碳排放量增加。从因子交互作用结果来看,土地利用程度与年平均降水量、与城镇中心距离的交互作用对耕地利用转型碳排放影响程度明显增强。因此,碳排放的控制需考虑社会经济因素和自然因素的共同作用。

此外,本文仅从自然、社会经济和距离因子 3 方面探究耕地利用转型碳排放形成机理,但缺乏对政策因子、土壤类型、新型经营主体等方面的考虑。下一步拟结合土地利用政策、土壤类型等方面开展耕地利用转型碳排放形成机理分析,并开展碳分区补偿研究。

6 结论

(1)1990—2000 年研究区耕地面积呈上升趋势,源于未利用地和草地的转入;2000—2010 年、2010—2020 年耕地面积均呈下降趋势,耕地与建设用地、林地之间的转型最为频繁,耕地主要转型为建设用地和林地。

(2)1990—2020 年研究区耕地利用转型碳排放量呈上升趋势,其中 2010—2020 年耕地利用转型碳排放最为剧烈,耕地利用转型碳排放最终呈现为碳源形式。耕地利用转型碳排放重心持续向东移动,其中 1990—2010 年重心移动距离最大,呈现东北地区碳排放恶化,而西南地区碳排放明显改善的特点。

(3)1990—2020 年研究区耕地利用转型碳排放非随机分布,具有较强的空间集聚性。热点区主要围绕南岗区向周围边界扩散,冷点区零星点状分布在东南部地区,耕地利用转型碳排放的冷热点空间分布格局与社会经济发展趋势、三北防护林工程、退耕还林政策的实施密不可分。

(4)单一因子对耕地利用转型碳排放空间分异的影响存在一定差异。与城镇中心距离是耕地利用转型碳排放的主控因子,其次是土地利用程度。双因子交互作用对耕地利用转型碳排放的影响强度明显高于单一因子。各因子之间交互作用以双因子增强为主,其中土地利用程度与年平均降水量、与城镇中心距离的相互作用的解释力相对较高,社会经济因子与距离因子、自然因子之间的交互作用明显强于内部因子的交互作用。

参 考 文 献

[1] 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 fuction in China since 1949[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(4):435 - 447. (in Chinese)

[2] 石小伟,冯广京,YI Yang,等. 浙中城市群土地利用格局时空演变特征与生态风险评价[J]. 农业机械学报,2020,51(5):242 - 251.
SHI Xiaowei, FENG Guangjing, YI Yang, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and ecological risk assessment of land use landscape patterns in central Zhejiang urban agglomeration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural

Machinery,2020,51(5):242 – 251. (in Chinese)

[3] OJOYI M M, MUTANGA O, ODINDI J, et al. Implications of land use transitions on soil nitrogen in dynamic landscapes in Tanzania[J]. Land Use Policy,2017,64:95 – 100.

[4] 周嘉,王钰萱,刘学荣,等.基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J].地理科学,2019,39(12):1955 – 1961.
ZHOU Jia, WANG Yuxuan, LIU Xuerong, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change[J]. Scientia Geographica Sinica,2019, 39(12):1955 – 1961. (in Chinese)

[5] LIU Y Q, LONG H L, LI T T, et al. Land use transitions and their effects on water environment in Huang – Huai – Hai plain, China[J]. Land Use Policy,2015,47:293 – 301.

[6] 张佰林,高江波,高阳,等.中国山区农村土地利用转型解析[J].地理学报,2018,73(3):503 – 517.
ZHANG Bailin, GAO Jiangbo, GAO Yang, et al. Land use transition of mountainous rural areas in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(3):503 – 517. (in Chinese)

[7] 廖柳文,龙花楼,马恩朴.乡村劳动力要素变动与耕地利用转型[J].经济地理,2021,41(2):148 – 155.
LIAO Liuwen, LONG Hualou, MA Enpu. Rural labor change and farmland use transition[J]. Economic Geography,2021, 41(2):148 – 155. (in Chinese)

[8] 宋小青.论土地利用转型的研究框架[J].地理学报,2017,72(3):471 – 487.
SONG Xiaoqing. Discussion on land use transition research framework[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(3):471 – 487. (in Chinese)

[9] 苏康传,杨庆媛,张佰林,等.山区农村土地利用转型与小农经济变迁耦合机理[J].地理研究,2019,38(2):399 – 413.
SU Kangchuan, YANG Qingyuan, ZHANG Bailin, et al. The coupling mechanism between rural land use transition and small-scale peasant economy change in mountainous areas[J]. Geographical Research,2019,38(2):399 – 413. (in Chinese)

[10] 宋小青,吴志峰,欧阳竹.耕地转型的研究路径探讨[J].地理研究,2014,33(3):403 – 413.
SONG Xiaoqing, WU Zhifeng, OUYANG Zhu. Route of cultivated land transition research[J]. Geographical Research,2014, 33(3):403 – 413. (in Chinese)

[11] 张荣天,焦华富.中国省际耕地利用效率时空格局分异与机制分析[J].农业工程学报,2015,31(2):277 – 287.
ZHANG Rongtian, JIAO Huafu. Spatial-temporal pattern differentiation and its mechanism analysis of using efficiency for provincial cultivated land in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 277 – 287. (in Chinese)

[12] 戈大专,龙花楼,屠爽爽,等.黄淮海地区土地利用转型与粮食产量耦合关系研究[J].农业资源与环境学报,2017, 34(4):319 – 327.
GE Dazhuan, LONG Hualou, TU Shuangshuang, et al. Coupling relationship between land use transitions and grain yield in Huang – Huai – Hai plain, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017,34(4):319 – 327. (in Chinese)

[13] 周应恒,胡凌啸,严斌剑.农业经营主体和经营规模演化的国际经验分析[J].中国农村经济,2015(9):80 – 95.
ZHOU Yingheng, HU Lingxiao, YAN Binjian. International empirical analysis of the evolution of agricultural management subjects and scale of operations[J]. Chinese Rural Economy,2015(9):80 – 95. (in Chinese)

[14] 宋小青,申雅静,王雄,等.耕地利用转型中的生物灾害脆弱性研究[J].地理学报,2020,75(11):2362 – 2379.
SONG Xiaoqing, SHEN Yajing, WANG Xiong, et al. Vulnerability to biological disasters: a novel field of cultivated land use transition research[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(11):2362 – 2379. (in Chinese)

[15] 张俊峰,张安录,董捷.武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):595 – 602.
ZHANG Junfeng, ZHANG Anlu, DONG Jie. Carbon emission effect of land use and influencing factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(5):595 – 602. (in Chinese)

[16] 李建豹,黄贤金,孙树臣,等.长三角地区城市土地与能源消费 CO_2 排放的时空耦合分析[J].地理研究,2019,38(9):2188 – 2201.
LI Jianbao, HUANG Xianjin, SUN Shuchen, et al. Spatio-temporal coupling analysis of urban land and carbon dioxide emissions from energy consumption in the Yangtze River Delta region[J]. Geographical Research,2019,38(9):2188 – 2201. (in Chinese)

[17] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,35(17):5898 – 5907.
MA Xiaozhe, WANG Zheng. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(17):5898 – 5907. (in Chinese)

[18] 杨皓然,吴群.不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J].地域研究与开发,2021,40(3):121 – 126.
YANG Haoran, WU Qun. Dynamic simulation of carbon emissions from land use in Nanjing City under different policy scenarios[J]. Areal Research and Development,2021,40(3):121 – 126. (in Chinese)

[19] 李璐,董捷,徐磊,等.功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区——以武汉城市圈为例[J].自然资源学报,2019, 34(5):1003 – 1015.

LI Lu, DONG Jie, XU Lei, et al. Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: a case study of Wuhan urban agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 1003 - 1015. (in Chinese)

[20] 盖兆雪,孙萍,张景奇. 松花江流域土地利用变化及形成机理——以哈尔滨段为例[J]. 水土保持研究,2019,26(4):314 - 320.
GAI Zhaoxue, SUN Ping, ZHANG Jingqi. Land use change and formation mechanism in Songhuajiang basin—Harbin section as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 314 - 320. (in Chinese)

[21] 李飞,张树文,杨久春,等. 社会经济数据空间化研究进展[J]. 地理与地理信息科学,2014,30(4):102 - 107.
LI Fei, ZHANG Shuwen, YANG Jiuchun, et al. A review on research about spatialization of socioeconomic data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(4): 102 - 107. (in Chinese)

[22] 邓晓斌. 基于 ArcGIS 两种空间插值方法的比较[J]. 地理空间信息,2008,6(6):85 - 87.
DENG Xiaobin. Comparison between two space interpolation methods based on ArcGIS[J]. Geospatial Information, 2008, 6(6): 85 - 87. (in Chinese)

[23] 邓楚雄,李民,宾津佑. 湖南省人口分布格局时空变化特征及主要影响因素分析[J]. 经济地理,2017,37(12):41 - 48.
DENG Chuxiong, LI Min, BIN Jinyou. Spatial-temporal variation characteristics and main influence factors analysis of population distribution pattern in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2017, 37(12): 41 - 48. (in Chinese)

[24] 周小平,王志伟,张学通,等. 人口分布空间插值及其在农牧交错带中的应用[J]. 草业科学,2010,27(6):143 - 152.
ZHOU Xiaoping, WANG Zhiwei, ZHANG Xuetong, et al. Spatial distribution of population based on interpolation and its application in the farming-pastoral transition regions[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(6): 143 - 152. (in Chinese)

[25] 庄大方,刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报,1997,12(2):10 - 16.
ZHUANG Dafang, LIU Jiyuan. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. Journal of Natural Resources, 1997, 12(2): 10 - 16. (in Chinese)

[26] 卢龙辉,瓦哈甫·哈力克,黄玲. 近 40 年克里雅绿洲人口时空变化对土地利用/覆盖变化的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(11):234 - 242.
LU Longhui, WAHAP Halik, HUANG Ling. Effect of temporal and spatial changes of population on land use and cover change in Keriya Oasis in past 40 years[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 234 - 242. (in Chinese)

[27] CAI Zucong, KANG Guoding, TSURUTA H, et al. Estimate of CH_4 emission from year-round flooded rice field during rice growing season in China[J]. Pedosphere, 2005, 15(1): 66 - 71.

[28] 何勇. 中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M]. 北京:气象出版社,2006.

[29] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),2007,37(6):804 - 812.
FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, et al. Estimation of carbon sinks in terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2007, 37(6): 804 - 812. (in Chinese)

[30] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京:南京大学,2010.
LAI Li. Carbon emission effect of land use in China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010. (in Chinese)

[31] 李虹,唐秀美,赵春江,等. 基于力矩平衡点法的北京市生态系统服务价值时空分布[J]. 农业机械学报,2015,46(11):151 - 156.
LI Hong, TANG Xiumei, ZHAO Chunjiang, et al. Temporal and spatial distribution of ecosystem service value in Beijing based on torque balance point method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 151 - 156. (in Chinese)

[32] 王宏,阎建忠,李惠莲. 中国 14 个连片特困地区的森林转型及其解释[J]. 地理学报,2018,73(7):1253 - 1267.
WANG Hong, YAN Jianzhong, LI Huilian. Forest transition and its explanation in contiguous destitute areas of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1253 - 1267. (in Chinese)

[33] 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 Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116 - 134. (in Chinese)

[34] 陈万旭,李江风,曾杰,等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. 地理研究,2019,38(9):2173 - 2187.
CHEN Wanxu, LI Jiangfeng, ZENG Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China[J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2173 - 2187. (in Chinese)