

中国耕地利用变化时空分异特征 及对耕地NPP的影响

原晋涛, 陈万旭, 曾 杰

(中国地质大学(武汉)区域生态过程与环境演变湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 近40年来中国耕地时空格局经历了深刻重塑。科学揭示中国耕地利用变化时空分异特征并评估其对耕地NPP的影响, 对于准确研判中国耕地资源利用形势与保障粮食安全具有重要意义。然而, 当前鲜见研究关注中国耕地利用变化时空分异特征及对耕地NPP的影响。基于此, 本文综合运用重心分析、空间统计分析、数字地形分析等方法定量分析了1980—2020年中国耕地利用变化时空分异特征及对耕地NPP的影响。结果表明: (1) 1980—2020年间中国转入耕地数量逐渐超过转出耕地, 总体呈南减北增、东减西增的空间分布特征, 耕地转入转出重心总体都在向西南方向移动; (2) 转入转出耕地都向高海拔高坡度地区推进, 转入耕地平均海拔与坡度总体高于转出耕地, 存在“占缓补陡”“占低补高”现象; (3) 转入转出耕地破碎化程度都不断加剧, 且转入耕地破碎化程度更高, 存在“占整补零”现象; (4) 1980—2000年间耕地与草地、林地转换最频繁, 2000—2020年间退耕还林还草和建设用占地侵占耕地现象愈发明显; (5) 研究期间中国耕地NPP总体呈上升趋势, 但在多个城市群及其周边区域有所下降。研究结果为认识中国耕地利用变化过程及其对耕地NPP的影响提供了依据, 为精细化耕地保护政策制定以及保障粮食安全提供科学支撑。

关键词: 耕地利用变化; 数字地形分析; 景观格局指数; 耕地NPP; 中国

十分珍惜、合理利用土地和切实保护耕地是中国的基本国策^[1]。维持耕地总量动态平衡, 保持耕地总体产能不变, 形成可持续耕地资源利用方式是落实耕地保护、维护粮食安全的重要抓手, 也是在新形势下社会发展活力快速提振、民生福祉增进改善的基本前提^[2]。近年来, 中国耕地出现了总体数量不断下降、占补耕地数量、质量和生态失衡、“非农化”“非粮化”利用等问题, 严重影响耕地数量、质量与生态功能^[3]。国家通过划定永久基本农田、建设高标准基本农田、建立耕地异地占补机制、强化占补耕地数量质量监管及落实耕地生态补偿政策等措施, 逐步构建了数量、质量、生态三位一体的耕地保护格局^[4]。耕地利用变化通过改变耕地地形特征、土壤质量与水热条件对耕地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)产生影响^[5]。随着经济社会发展与城市化快速推进, 生产、生活和生态用地需求矛盾进一步上升, 耕地利用变化也因此不断加剧^[6]。然而, 当前中国耕地利用变化时空分异特征仍不清楚, 其对不同地区耕地NPP影响也需进一步探究。因此, 有必要明晰中国耕地利用变化时空分异特征, 量化其对耕地NPP的影

收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001187); 湖北省教育厅哲学社会科学研究项目(22G024); 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022262)

作者简介: 原晋涛(1999-), 男, 山西运城人, 硕士, 研究方向为城乡转型治理。

E-mail: yjt251020@cug.edu.cn

通讯作者: 陈万旭(1989-), 男, 河南信阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为资源环境、区域经济。

E-mail: cugcwx@sina.com

响,从而为推进耕地保护工作、端牢中国饭碗提供科学支撑^[7]。

中国人均耕地面积少、耕地整体质量差、耕地后备资源不足,严峻的耕地利用形势使得耕地利用变化受到了社会各界的广泛关注^[8]。相关研究在耕地时空分布格局、开发利用模式、耕地多功能、驱动机制、耕地保护等方面进行了丰富探索^[9-12]。耕地利用变化从改变耕地数量、质量、地形特征以及开发利用方式等方面对耕地生产生态功能产生正向或负向的影响^[13]。一方面,以往研究发现耕地利用集约水平的提高对于耕地经济效益、粮食生产以及生态效率都具有积极影响^[14-16]。另一方面,研究表明耕地海拔爬升、破碎化程度升高是快速城镇化背景下耕地利用变化的一些不良趋势,这些改变将恶化耕地粮食生产的自然环境条件、减少农户收入、降低耕作效率、阻碍农业现代化发展^[17,18]。对于耕地利用变化趋势,大量研究从科技赋能耕地增收增产、耕地利用的劳动—资金—技术集约化转型、土地休耕轮作制度优化等方面对形成科学合理可持续的耕地利用方式进行了深度探索,对于缓解不断上升的人地矛盾以及在经济发展、耕地保护与生态文明建设中取得平衡具有重要意义^[19,20]。

总体来说,以往研究围绕耕地利用变化进行了广泛探索,对耕地利用现状、问题、调控管理策略形成了丰富的理论基础。然而,当前有关耕地利用变化时空分异特征的研究通常局限于耕地利用变化总体视角,缺乏从耕地转入转出两方面出发对耕地数量质量特征进行的对比探究,这不利于深度剖析不同地区耕地利用变化内部特征,并且阻碍了精细化与差异化耕地保护政策制定。此外,以往研究多关注区域尺度耕地利用变化对粮食产能影响研究,缺乏在全局视角下评估中国耕地利用变化对粮食产能影响的空间特征与差异性^[21-23]。NPP被广泛应用于表征耕地产能变化^[24-26]。耕地NPP可以指征粮食作物的有机物质干重,为不同类型农地粮食产量提供统一衡量标准^[27]。以往有大量研究基于耕地NPP数据,利用趋势分析、空间分析、数量统计等方法探究了多尺度耕地生产力时空格局与变化趋势^[28-30];也有研究通过分别计算转入转出耕地的NPP变化量并建模来测度耕地占补对耕地粮食生产能力的影响^[31,32]。因此,本文以耕地NPP为评估指标,量化全国范围内耕地利用变化对其粮食产能的影响。

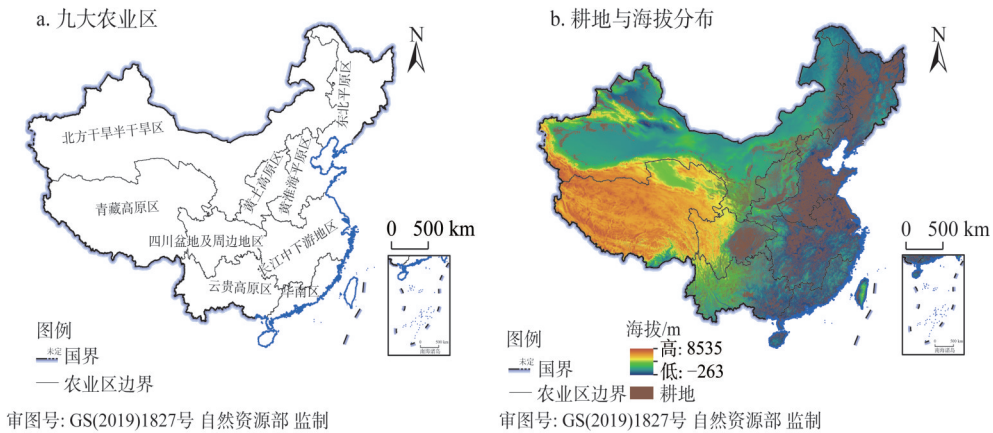
本文借助空间统计与重心分析模型揭示了中国转入转出耕地的时空分异特征并刻画其空间演变趋势,揭示了全国耕地利用变化的空间分布、差异及变化规律,结合坡谱和海拔谱等数字地形分析方法对比分析了转入转出耕地地形差异特征,引入景观破碎度指数测度转入转出耕地景观形态差异,最后分析耕地利用变化对全国不同农业区耕地NPP的影响,以此评估耕地利用变化对粮食产能的影响以及空间差异,为研判耕地利用变化的生态与社会经济效应、精细化和差异化耕地保护政策提供科学支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

中国地形复杂多样,山区面积广大,少量宜耕优质土地集中在平原、盆地地区,并且受水热条件、地形特征、基础设施水平等因素限制,不同地区耕地质量差异明显^[13]。近年中国经济发展快速提升,人均GDP由1980年的468元上升到2022年的85698元,城镇化水平从1980年的19.39%提升到2022年的65.22%。快速的经济社会发展对耕地与粮食安全形成了巨大压力,导致耕地利用变化不断加剧。耕地利用变化通过改变耕地地形、水热条件、土壤肥力等多种属性影响耕地整体质量,有可能降低粮食产能并威胁粮

食安全。因此，有必要厘清中国耕地利用变化时空分异特征，揭示其变化规律并探究其对耕地粮食产能的影响。为了深入揭示中国耕地利用变化时空特征，本文拟进一步分析全国九大农业区内部耕地利用变化时空特征以及其对耕地NPP影响的差异性（图1）。



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Map of the study area

1.2 数据来源

研究涉及数据包括土地利用数据、DEM数据、NPP数据与行政区划数据。其中土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（www.resdc.cn）的中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集，用到了1980年、1990年、2000年、2010年和2020年五期数据^[33]。该数据空间分辨率为30 m×30 m，主要以美国陆地卫星 Landsat 遥感影像为主要数据源，以人机交互目视解译为主要方法进行影像监督分类获得。一级分类包括耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地。需要注意的是，遥感数据受空间分辨率以及解译精度限制，狭窄道路、耕地田垄、灌溉设施等细小地物常包含于耕地面积内，数据准确性差于实地调查数据，但以往研究已证明其在探究相对条件下的耕地变化情况以及耕地总体变化趋势等方面足够可靠^[21]。研究在计算并构建转入转出耕地坡度与海拔谱时均以 ASTER GDEM v3 数据为基础，该数据获取自美国国家航空航天局下属陆面过程分布式存档中心（lpdaac.usgs.gov），数据空间分辨率为30 m×30 m^[34]。NPP数据与DEM数据来源相同，空间分辨率为500 m×500 m^[35]。

1.3 研究方法

1.3.1 耕地利用变化空间特征分析

为分析转入耕地来源、转出耕地去向的空间分布特征，本文在10 km×10 km 格网尺度上评估了每个格网中耕地转换的主导类型。主导类型通过计算格网内最高耕地转换类型的面积占格网总面积的比值来确定，具体计算公式如下：

$$S_i = Area_{Ci} / Area_i$$

(1)

式中： S_i 指第*i*个像元中主导耕地转换类型的剧烈程度；在各种耕地转换类型（耕地—林地草地、耕地—水体、耕地—城乡建设用地、林地—耕地、草地—耕地、未利用地—耕地）中，将面积最大、最常发生的一类记为*C*；主导耕地转换类型的剧烈程度分为0~1%、

1%~2%、2%~3%和>3%四个区间； $Area_{Ci}$ 指第*i*个像元中发生C类型耕地转换的面积 (m^2)； $Area_i$ 指第*i*个像元的面积 (m^2)。

1.3.2 转入转出耕地重心分析

研究通过测度各时期转入耕地与转出耕地的物理重心及其迁移轨迹，刻画中国耕地利用变化空间格局演变特征^[36]。耕地转入转出重心空间迁移显示了不同区域内耕地资源动态变化与耕地利用形势改变。重心计算公式如下：

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n CRA_{pi} X_i}{\sum_{i=1}^n CRA_{pi}} \quad (2)$$

$$Y_p = \frac{\sum_{i=1}^n CRA_{pi} Y_i}{\sum_{i=1}^n CRA_{pi}} \quad (3)$$

式中： X_p 和 Y_p 分别代表耕地转入转出重心的X与Y坐标；*p*指相应的研究时期； CRA_{pi} 指*p*时期内第*i*个研究单元中转入或转出耕地的总量 (m^2)； X_i 指该研究单元重心的*x*坐标；相应的 Y_i 对应研究单元重心的*y*坐标；*n*为研究单元个数 (个)。

1.3.3 耕地利用变化数字地形分析

谱线能表征不同值域内研究要素数量分布情况，原理上相当于由组距尽量小的频率分布直方图拟合而得的曲线^[17,37]。本文用海拔谱与坡谱来描述转入转出耕地在不同海拔或坡度区间内的分布情况。曲线横坐标为耕地的海拔或坡度，纵坐标为相应区间内转入转出耕地的面积占总耕地面积的比率。计算公式如下：

$$P_i = Area_i / Area_t \times 100\% \quad (4)$$

式中： P_i 指坡度或海拔为*i*的转入转出耕地占总转入转出耕地的比例 (%)； $Area_i$ 指坡度或海拔为*i*的转入转出耕地的面积 (m^2)； $Area_t$ 指总的转入转出耕地面积 (m^2)。为防止区间过大掩盖曲线的某些明显波动信息，区间过小难以对比分析不同时段曲线特征，经多次试验，在绘制坡谱与海拔谱曲线所采用的横坐标间隔分别为 0.05° 与50 m。

1.3.4 耕地利用变化景观破碎度分析

描述景观格局的指标体系比较丰富^[38]，本文从斑块密度、斑块面积和斑块形状三个维度刻画转出转入耕地地块的破碎化程度。具体指标选取如下：

PD (Patch Density)：斑块密度，研究区内某种景观类型斑块个数与研究区总景观面积的比值。*PD*值越高，说明区域内零星散落的景观类型斑块越多，该类型景观愈破碎。具体计算公式如下：

$$PD = \frac{N_i}{A} \quad (5)$$

式中：*PD*表示斑块密度； N_i 代表研究区内*i*种景观类型的斑块个数 (个)；*A*代表研究区面积 (m^2)。

AREA_MN (Mean Patch Area)：平均斑块面积，反映景观被分割的破碎程度以及景观空间结构的复杂程度^[39]。该值越低代表转入转出耕地地块空间结构越复杂，整体更为破碎。具体计算公式如下：

$$AREA_MN_i = \frac{A_i}{N_i} \quad (6)$$

式中： $AREA_MN$ 表示*i*种景观类型的平均斑块面积 (m^2)； A_i 代表这种景观类型的总面积 (m^2)。

SHAPE_AM (Area-weighted Mean Shape Index)：面积加权的平均形状指数，表征

转入转出耕地地块形状的复杂程度，其值越大代表对应景观类型的破碎化程度更高。具体计算公式如下：

$$SHAPE_AM = \sum_{i=1}^n (0.25P_i \times \sqrt{A_i}) / A \quad (7)$$

式中： $SHAPE_AM$ 表示面积加权平均形状指数； n 代表地类总斑块个数（个）； P_i 代表斑块的周长（m）； A_i 代表斑块的面积（m²）。

1.3.5 耕地利用变化对耕地NPP影响评估

本文统计了全国范围不同地区耕地NPP在各研究时段内的变化量，以此表征耕地利用变化对耕地粮食产能所产生的影响。由于数据来源受限，只对2000—2010年与2010—2020年两个时段进行研究。通过分析不同区域格网内耕地NPP变化量的差异，结合各地地区的立地条件与发展特点来评估地区耕地利用变化对耕地NPP的影响及其空间差异，总结这种影响的空间规律并针对性提出政策建议。

2 结果分析

2.1 1980—2020年中国耕地利用变化时空分布特征

1980—2020年转入转出耕地空间分布与变化特征如图2所示。1980—1990年、1990—2000年、2000—2010年与2010—2020年全国转入耕地面积分别为410.056万hm²、705.999万hm²、1571.384万hm²与1477.298万hm²，转出耕地面积分别为275.885万hm²、385.306万hm²、1634.671万hm²与1624.420万hm²。1980—2010年转入转出耕地面积都持续增加，之后有所减少（表1）。在1980—2000年耕地转入多于转出，但在2000—2020年转出耕地数量反超，耕地面积持续减少。从耕地转出来看，1980—1990年东北平原区、北方干旱半干旱区与长江中下游地区耕地转出数量最多，分别为63.703万hm²、48.395万hm²与45.759万hm²，占全国转出耕地数量的57.218%，而其他六个农业区转出耕地数量较少，这种情况一直保持到2000—2010年。2010—2020年，转出耕地面积的北减南增致使全国九大农业区耕地转出数量空间分布趋于均衡。转入耕地数量的空间变化特征与转出耕地类似，但耕地转入数量最先开始明显增长的是东部的黄淮海平原区。从转入转出耕地平衡情况来看，黄土高原区、黄淮海平原区、四川盆地及周边地区、长江中下游地区、云贵高原区及华南区在整个研究时段中几乎都表现出耕地转出多于转入的特征，只有黄土高原区与云贵高原区在1990—2000年耕地转入多于转出。长江中下游地区转入转出耕地差异最为悬殊，在1980—1990年、1990—2000年和2000—2010年转出耕地比转入耕地分别多出33.616万hm²、68.453万hm²和162.143万hm²，远高于同时期其他农业区。整个研究时段中北方干旱半干旱区、东北平原区和青藏高原区耕地数量都呈净增加趋势，并且这个趋势在不断减弱，只有东北平原区在2010—2020年耕地数量略微减少。总的来说，全国耕地利用变化呈现出南减北增、东减西增的空间分异特征，这一特征在2000—2010年间最为明显。

1980—2020年中国转入转出耕地重心迁移轨迹如图3所示。总体来说，耕地转入转出重心总体向西南方向迁移，分别移动了1240.319 km和669.125 km。1980—1990年，中国东北部的东北平原区、北方干旱与半干旱区东部转入耕地数量最多，随着中部、东部、南部地区转入耕地数量明显上升，转入耕地重心在1990—2000年与2000—2010年分别向西南偏西与西南偏南方向迁移了831.168 km与809.404 km，之后又向西北方向移动

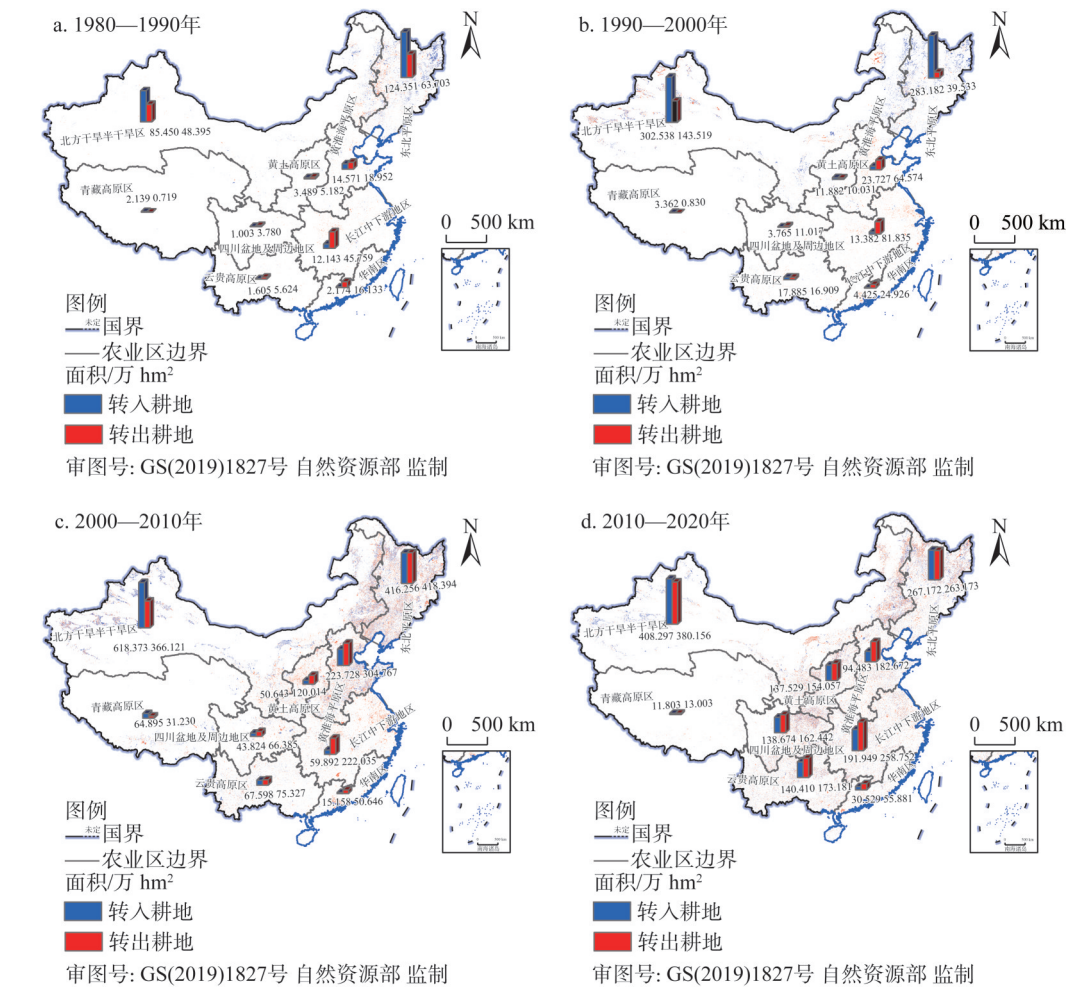


图2 1980—2020年中国转入转出耕地空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of cropland transfer-in and transfer-out in China during 1980-2020

表1 1980—2020年中国耕地利用变化的面积、平均坡度与平均海拔

Table 1 Area, average slope, and average elevation of cropland use change in China during 1980-2020

研究时段/年	面积/万 hm^2		平均坡度/(°)		平均海拔/m	
	转出耕地	转入耕地	转出耕地	转入耕地	转出耕地	转入耕地
1980—1990	275.885	410.056	1.892	1.773	277.190	272.573
1990—2000	385.306	705.999	2.095	2.308	518.653	542.841
2000—2010	1634.671	1571.384	3.586	3.218	533.439	664.329
2010—2020	1624.420	1477.298	4.798	5.360	604.477	658.597

了447.611 km。转出耕地重心在1990—2000年与转入耕地迁移方向相同，向西南偏西方向位移了931.518 km。随着中国东南地区转出耕地数量的大幅度增加，转出耕地重心在2000—2010年与2010—2020年分别向东、南方向迁移了493.126 km、237.096 km。

耕地与林地、草地、水体、城乡建设用地和未利用地之间相互转换过程的强弱程度如图4所示。从耕地转出来看，1980—2020年的四个时段中耕地主要转出为建设用地、

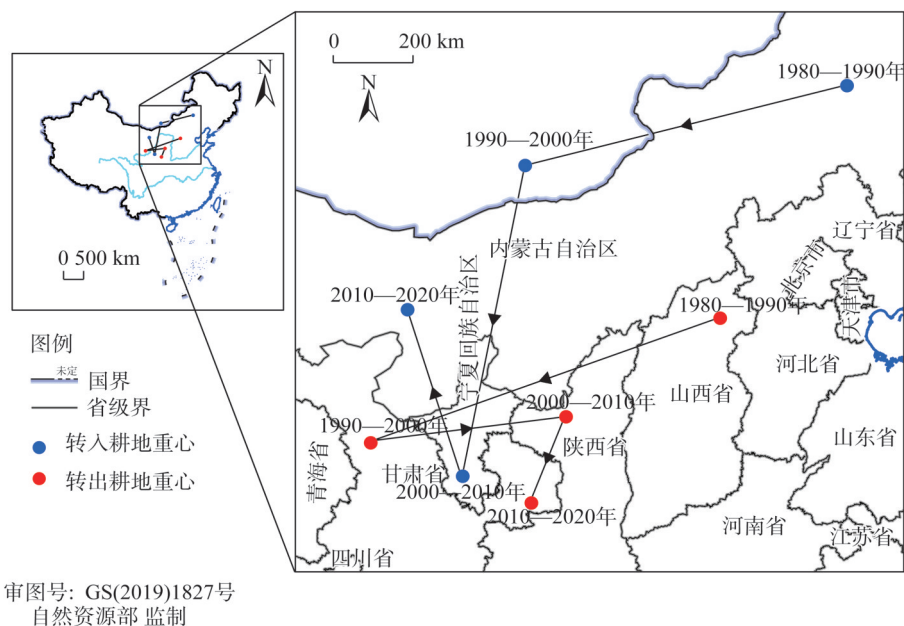


图3 1980—2020年中国转入转出耕地重心迁移轨迹

Fig. 3 Migration trajectory of the gravity center of cropland transfer-in and transfer-out in China during 1980-2020

林地和草地，转出面积分别为1998.800万 hm^2 、635.448万 hm^2 和515.884万 hm^2 ，不同地区耕地转出的剧烈程度随时间不断增强。1980—1990年建设用地占用耕地主要发生在黄淮海平原区、四川盆地及周边地区中部与华南区西南部。此后该现象以上述区域为中心不断增强扩大，到2000—2010年达到顶峰，全国有629.259万 hm^2 耕地变为建设用地，全国约6.259%的区域建设用地占用耕地面积超过了当地总土地面积的3%。耕地转换为林地、草地在1980—1990年主要发生在东北平原地区，从1990—2000年开始这种现象以黄土高原区及其西部、南部和云贵高原区为主不断增强，在2010—2020年间有1023.193万 hm^2 耕地变为林地和草地。从耕地转入来看，新增耕地主要来自于林地与草地，1980—2020年共有853.532万 hm^2 林地与1093.448万 hm^2 草地转为耕地。在1980—1990年，林草地转耕地主要发生在东北平原区西部与北方干旱半干旱区东部。此后，林地转耕地现象广泛分布在中国南方地区，以长江中下游平原区最为明显，而草地转林地现象集中在北方干旱半干旱地区以及青藏高原区西部。林地草地转耕地现象都在2000—2010年最为显著，之后相对减弱。

2.2 1980—2020年中国耕地利用变化地形特征

1980—2020年间，中国转入耕地与转出耕地坡谱形态基本一致，不同坡度范围内耕地面积的变化趋势基本相同，曲线都呈先上升、后下降的特征。转入转出耕地坡谱的谱峰都位于 0.1° 附近（图5）。坡度大于 0.1° 时，转入转出耕地面积占比都随坡度的升高而降低并逐渐趋于0。在时间顺序上，转出耕地的坡谱形态变化与转入耕地的基本相同， 2° 以下的耕地转入转出比例不断减少，其中 1° 以下的减少最为明显。 1° 以下转出耕地与转入耕地面积占比分别减少了23.382%与21.953%。在更陡的地区，例如坡度大于 5° 时，转出耕地面积占比从1980—1990年的9.501%上升到2010—2020年的30.421%。同时段相同坡度区间内，转入耕地面积占比从9.325%上升到了34.631%。证明耕地转入转出整体在

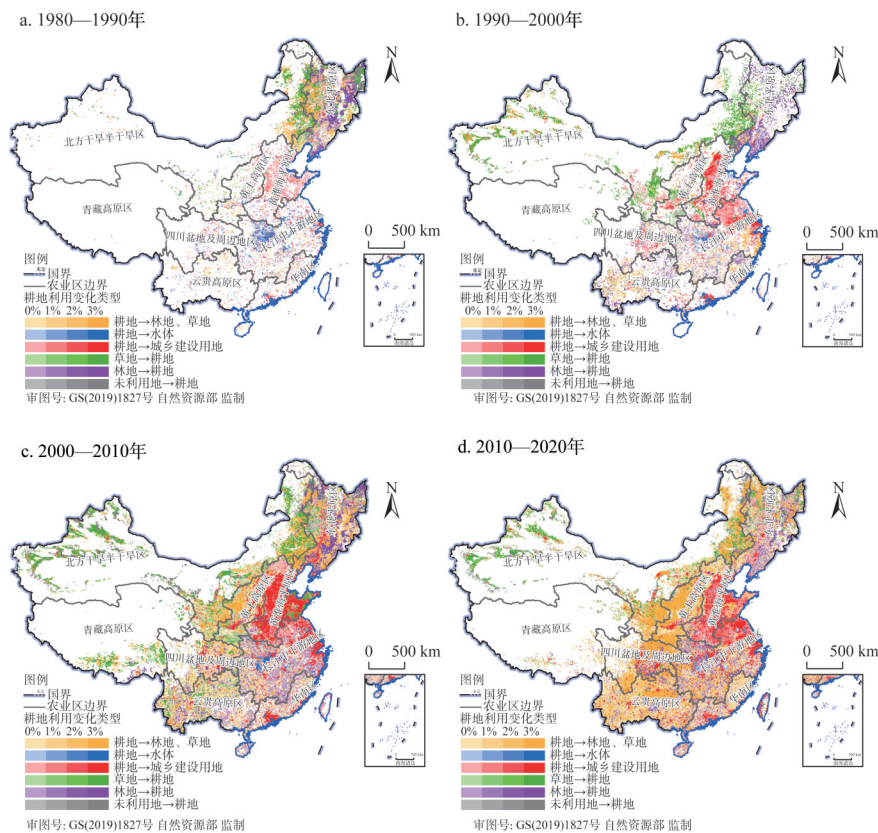


图4 1980—2020年中国耕地利用变化空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of cropland use change in China during 1980–2020

向高坡度地区发展的同时,转入耕地的坡度要高于转出耕地,这意味着耕地的整体坡度在抬升,表1的结果印证了这一结论。最初在1980—1990年,转入耕地的平均坡度为 1.773° ,低于转出耕地的 1.892° ,而在2010—2020年,转入耕地的平均坡度上升了 3.587° ,达到了 5.360° ,这高于同时期转出耕地的 4.798° 。结论说明中国耕地利用变化存在一定程度的“占缓补陡”现象。

从海拔谱来看,1980—2020年转入转出耕地海拔分布状况与坡度分布有很大差别。转入转出耕地海拔的分布区间更广,海拔谱谱峰更多且相对分散。转入耕地与转出耕地相比,海拔谱峰值更低,谱宽更宽,表示转入耕地海拔分布的优势区间更宽。四个时间段中,转出耕地大部分位于海拔较低地区,海拔在200 m以下的转出耕地平均占比为46.306%,而转入耕地的这一数值为36.761%。从时间趋势上来看,转入转出耕地海拔谱的变化比较剧烈。转出耕地海拔谱在1980—1990年具有两个谱峰,分别位于0 m与125 m附近,其他三个时段海拔谱只有单个谱峰,都位于0 m左右。而转入耕地海拔谱谱峰变化不大,都位于60 m、125 m和325 m附近,变化主要体现在随着时段推移,谱峰值在不断降低,海拔谱在不断趋于矮而宽。转入耕地在各海拔高度覆盖更平均,在高海拔区域的面积占比有所增加。转入耕地平均海拔由1980—1990年的272.573 m上升到了2010—2020年的658.597 m,上升了386.024 m,同时期转出耕地的平均海拔由277.190 m上升到604.477 m,上升了327.287 m(表1)。这证明耕地利用变化在逐渐向高海拔地区

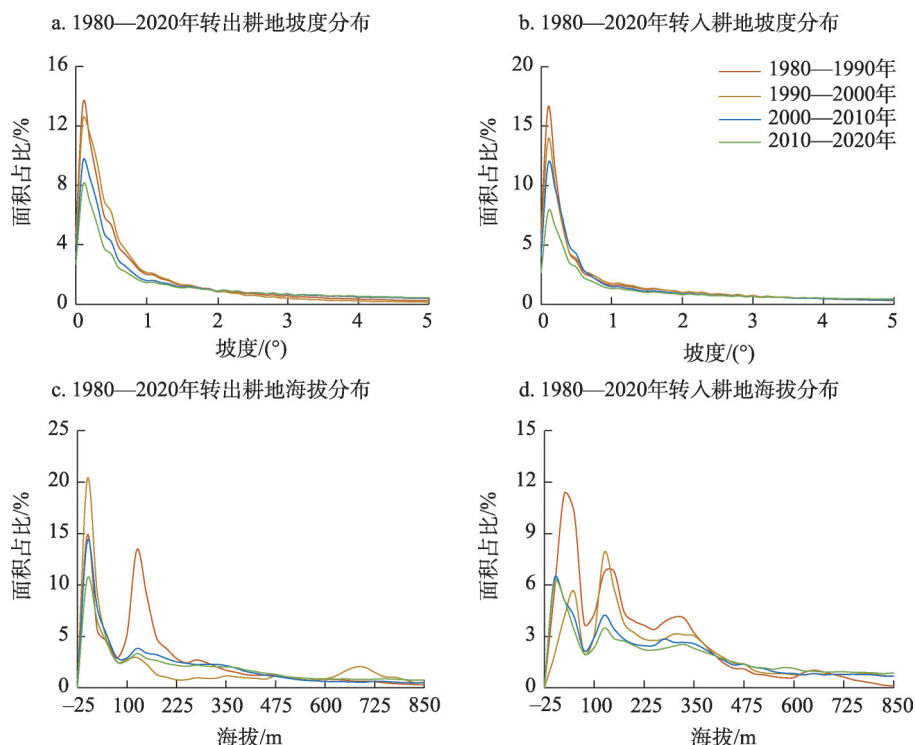


图5 1980—2020年中国耕地利用变化的坡度谱与海拔谱

Fig. 5 Slope spectrum and elevation spectrum of cropland use change in China during 1980-2020

发展,并且存在“占低补高”现象。

2.3 1980—2020年中国耕地利用变化景观破碎度特征

1980—2020年,转入转出耕地破碎度变化情况如图6所示。转出耕地与转入耕地破碎度的时间变化特征较为相似。转入转出耕地地块的 PD 总体都呈持续增加趋势,在2010—2020年时段达到峰值。这意味着转出耕地与转入耕地的斑块数量都在不断增加,在景观类型尺度上表明转入转出耕地景观破碎化程度在不断加深。转入转出耕地的 $AREA_MN$ 基本呈持续下降趋势,只有转入耕地的 $AREA_MN$ 在1980—2000年有少量增加。 $AREA_MN$ 在转入转出耕地面积不断增加的同时降低,表明有更多细小耕地地块被占用或补充。转入转出耕地的 $SHAPE_AM$ 变化趋势差别较大。1980—2020年间,转出耕地的 $SHAPE_AM$ 先增加后减少,而转入耕地的 $SHAPE_AM$ 在此期间持续下降,证明转出耕地的地块形状最初较复杂而后不断简化,转入耕地的地块形状则在持续简化。对比耕地转入转出两个方面,可以发现在1980—1990年、1990—2000年和2000—2010年三个时段中,转出耕地的 PD 值始终高于转入耕地,表明在这三个时期内,转入耕地的破碎度要小于转出耕地。在2010—2020年,转入耕地的破碎度超过了转出耕地,出现“占整补零”现象。另外,四个时期内转出耕地的 $AREA_MN$ 与 $SHAPE_AM$ 都要小于转入耕地,证明就平均地块面积以及地块形状复杂性来说,转入耕地地块破碎度都要高于转出耕地。

2.4 2000—2020年中国耕地利用变化对耕地NPP的影响

2000—2020年耕地利用变化对耕地NPP影响空间分布与变化情况如图7所示。2000—2020年,黑河—腾冲线以东地区耕地NPP存在广泛增加现象,耕地NPP发生减少

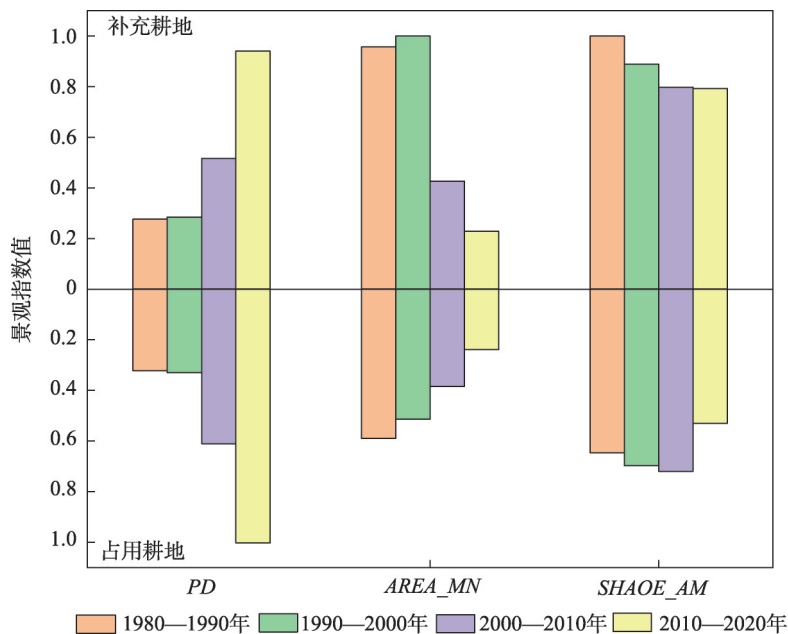


图6 1980—2020年中国转入转出耕地地块的破碎化程度及其变化

Fig. 6 Changes in the fragmentation of cropland transfer-in and transfer-out in China during 1980-2020

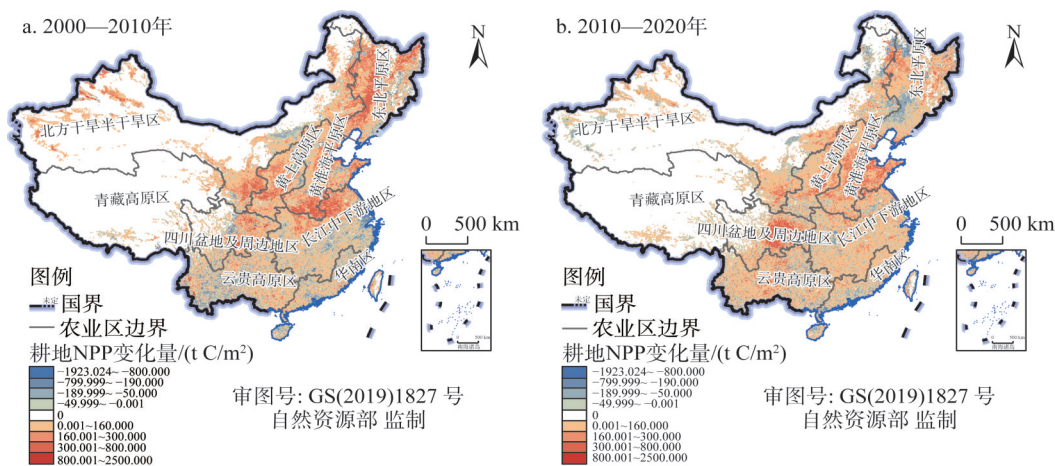


图7 2000—2020年中国耕地NPP变化空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of cropland NPP changes in China during 2000-2020

的区域相对较少。在2000—2010年,耕地NPP发生增加与减少的格网占总数的比例分别为72.79%与27.21%,在2010—2020年分别为72.49%与27.51%。受耕地利用变化影响,耕地NPP发生降低的格网增加了298个。2010—2020年全国耕地NPP变化量均值为617.56 t C/m²,比2000—2010年减少了94.39 t C/m²。耕地利用变化在整体上促进了耕地总NPP的增加,但该作用在2010—2020年有所减弱。2000—2010年耕地NPP增加最显著的区域位于东北平原中部、黄淮海平原与长江中下游平原交界处附近以及黄土高原西部;但在2010—2020年,上述区域耕地NPP增加量明显降低,增加最显著的区域主要包括黄淮海平原中部与东部以及四川盆地地区。在2000—2010年,一些城市群中心区域耕

地NPP出现集中减少现象,如长三角城市群、珠三角城市群、长江中游城市群和滇中城市群。2010—2020年这种现象在哈长城市群北部与辽中南城市群北部较明显,在长三角、珠三角、长江中游城市群中心区域虽仍存在但相对较弱。整体来看,耕地利用变化在一定程度上促进了中国耕地总NPP的上升,但在部分区域内,尤其是一些城市群地区,耕地利用变化对耕地NPP存在消极影响,降低了相应地区的耕地粮食产能。

3 结论与讨论

3.1 结论

以全国为研究区,从时空分布、地形、破碎化程度和耕地转换类型的角度分析了中国耕地利用变化,评估了耕地利用变化对不同地区耕地NPP影响的差异,主要结论如下:

(1) 1980—2020年中国转入转出耕地面积都不断上升,转出数量从2000年开始超过转入,之后反转。耕地利用变化呈南减北增、东减西增的空间格局,转入转出耕地重心都向西南移动。

(2) 1980—2000年耕地利用变化以东北地区耕地与林地、草地间的相互转换及黄淮海平原建设用地占用耕地现象最为剧烈。2000—2020年以黄土高原、云贵高原的耕地转林地、草地现象为主。

(3) 1980—2020年高坡度转入转出耕地占比不断增加。耕地转入转出的平均海拔与坡度不断上升,且转入耕地上升更明显。2010—2020年转入耕地平均海拔与坡度比转出耕地分别高54.12 m与0.562°。存在“占缓补陡”“占低补高”现象。

(4) 1980—2020年转入转出耕地地块破碎化程度都不断升高。相较于转入耕地,转出耕地地块密度与平均面积更大,地块形状复杂度更低,整体破碎化程度也更低。存在“占整补零”现象。

(5) 2000—2020年耕地利用变化在全国范围内对耕地NPP的影响以促进其增加为主,但在长三角、珠三角地区以及长江中游城市群等多个发达的城市群区域都识别到广泛的耕地NPP减少现象,这些地区的耕地利用变化对于耕地粮食产能造成了负面影响。

3.2 讨论

本文从时空分布、数字地形分析、景观碎化程度等视角分析了1980—2020年全国耕地利用变化的时空分异特征,以NPP为指标评估了耕地利用变化对其粮食产能的影响。研究主要关注转出耕地与转入耕地在不同空间位置上的数量差异,坡度、高程和破碎度方面的质量差异以及来源地类与转入地类的转换类型差异。总体上发现了“占缓补陡”“占低补高”“占整补零”等耕地利用趋势。对于耕地NPP的分析结果发现在多个城市群及周边地区耕地NPP存在广泛降低现象,这与全国大部分地区耕地NPP增加的趋势相反。研究对于从新视角发现的耕地利用趋势缺乏定量评估以及区域层面横向对比,不利于明确各地区耕地增减失衡实际情况以及空间分异。另外受研究体量、数据可获取性等因素的限制,研究并未对耕地利用变化趋势的驱动因素及其影响进行分析,之后的研究应该进行相应完善。

作为土地用途管制的核心内容与有效保护耕地的重要途径,耕地占补平衡政策通过多年的实施已经帮助国家遏制了耕地数量不断下降的恶性趋势,但此过程中各地政府的形式化占补平衡、监察机制与补偿激励措施的缺憾以及耕地占补平衡指标折算体系不完

善等问题也亟需解决^[40-42]。上述问题可能是本文所发现的“占缓补陡”“占低补高”“占整补零”等耕地利用趋势的主要症结。因此,应该持续优化丰富农用地质量等级的评价指标体系与核算方法,规范农地流转、加强土地整治,尽量避免“占缓补陡”“占低补高”“占整补零”等现象。应该严格规范新增耕地监察与验收流程,加强政策调控,明确责任主体,健全问责机制,确保新增耕地数量质量过关。依托于不同地区丰富多样的耕地资源现状,各地区应该接续实施耕地跨省域易地占补政策,充分利用区域间土地利用模式的比较优势^[43]。另外,可以考虑补充与改造相结合的方式,对新增耕地及现有耕地改善其土壤、排灌条件,改造其农田水利等基础设施,在保持数量平衡的同时从根本上提升耕地质量^[44]。

参考文献(References):

- [1] 严金明,郭栋林,夏方舟. 中国共产党土地制度百年演变: 影响历史进程的十大标志性事件. 中国土地科学, 2022, 36(2): 1-9. [YAN J M, GUO D L, XIA F Z. Centennial evolution of land institutions of the communist party of China: Ten landmark events affecting the historical process. China Land Science, 2022, 36(2): 1-9.]
- [2] 魏洪斌,吴克宁,赵华甫,等. 中国耕地动态变化与占补平衡分析. 国土资源科技管理, 2015, 32(1): 115-124. [WEI H B, WU K N, ZHAO H F, et al. Analysis of the dynamic change and requisition-compensation balance of cultivated land in China. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2015, 2(1): 115-124.]
- [3] 于法稳,代明慧,林珊. 基于粮食安全底线思维的耕地保护: 现状、困境及对策. 经济纵横, 2022, (12): 9-16. [YU F W, DAI M H, LIN S. Cultivated land protection based on bottom line thinking of food security: Current situation, difficulties and countermeasures. Economic Review Journal, 2022, (12): 9-16.]
- [4] 卢艳霞,王柏源. 耕地保护制度与政策的演进及其逻辑. 中国土地, 2022, (2): 4-8. [LU Y X, WANG B Y. The evolution of cropland protection systems and policies and their logic. China Land, 2022, (2): 4-8.]
- [5] 柯新利,杨柏寒,盛思雨. 耕地位移的影响与对策建议. 中国土地, 2023, (2): 4-7. [KE X L, YANG B H, SHENG S Y. The influence and countermeasures of cropland displacement. China Land, 2023, (2): 4-7.]
- [6] 苏锐清,曹银贵. 中国耕地利用变化的研究方法分析: 立足驱动与模拟研究. 中国农业资源与区划, 2019, 40(6): 96-105. [SU R Q, CAO Y G. Methods analysis on cultivated land use changes in China: Based on driving and simulation. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(6): 96-105.]
- [7] 赵爱栋,彭冲,许实,等. 生态安全约束下耕地潜在转换及其对粮食生产的影响: 以东北地区为例. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 124-131. [ZHAO A D, PENG C, XU S, et al. Impact of farmland conversion grain output under the ecological constraint: Based in the northeast of China. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(11): 124-131.]
- [8] 李秀军,田春杰,徐尚起,等. 我国农田生态环境质量现状及发展对策. 土壤与作物, 2018, 7(3): 267-275. [LI X J, TIAN C J, XU S Q, et al. Current situation of ecological environment quality and countermeasures in China's farmland. Soils and Crops, 2018, 7(3): 267-275.]
- [9] 王文旭,曹银贵,苏锐清,等. 我国耕地变化驱动力研究进展: 驱动因子与驱动机理. 中国农业资源与区划, 2020, 41(7): 21-30. [WANG W X, CAO Y G, SU R Q, et al. Driving forces of cultivated land change in China: Driving factors and driving mechanism. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(7): 21-30.]
- [10] KUANG W, LIU J, TIAN H, et al. Cropland redistribution to marginal lands undermines environmental sustainability. National Science Review, 2022, 9: nwab091, Doi: 10.1093/nsr/nwab091.
- [11] SHI X, WANG W, SHI W. Progress on quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on cropland change. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(3): 339-354.
- [12] 杜国明,薛濡壕,于凤荣. 耕地集约利用转型的理论解析. 资源科学, 2022, 44(3): 425-435. [DU G M, XUE R H, YU F R. Theoretical analysis of farmland intensive use transition. Resources Science, 2022, 44(3): 425-435.]
- [13] 袁承程,张定祥,刘黎明,等. 近10年中国耕地变化的区域特征及演变态势. 农业工程学报, 2021, 37(1): 267-278. [YUAN C C, ZHANG D X, LIU L M, et al. Regional characteristics and spatial-temporal distribution of cultivated land

- change in China during 2009-2018. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(1): 267-278.]
- [14] 侯孟阳, 邓元杰, 姚顺波. 城镇化、耕地集约利用与粮食生产: 气候条件下有调节的中介效应. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(10): 160-171. [HOU M Y, DENG Y J, YAO S B. Urbanization, intensive cropland use, and grain production: A moderated mediating effect test under climate conditions. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(10): 160-171.]
- [15] 胡贤辉, 刘蒙罢, 文高辉. 中国耕地集约利用与生态效率耦合协调时空分异特征研究. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(10): 2282-2294. [HU X H, LIU M B, WEN G H. Spatial-temporal variability of coupling coordination between intensive use of cultivated land and ecological efficiency in China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(10): 2282-2294.]
- [16] 王国刚, 刘彦随, 陈秧分. 中国省域耕地集约利用态势与驱动力分析. *地理学报*, 2014, 69(7): 907-915. [WANG G G, LIU Y S, CHEN Y F. Dynamic trends and driving forces of land-use intensification in the cultivated land of China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 907-915.]
- [17] YUAN J T, CHEN W X, ZENG J, et al. Exploring the rules of cropland elevation uplift in China. *Journal of Mountain Science*, 2023, 20: 1824-1841.
- [18] 张洁, 陈美球, 谢贤鑫, 等. 劳动力禀赋、耕地破碎化与农户生态耕种决策行为. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(3): 28-36. [ZHANG J, CHEN M Q, XIE X X, et al. Farmer's labor endowment, farmland fragmentation and farmer's ecological farming decision-making behavior. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(3): 28-36.]
- [19] 陈红, 陈莎, 叶艳妹. 面向农业高质量发展的耕地保护转型研究. *农业现代化研究*, 2023, 44(1): 55-64. [CHEN H, CHEN S, YE Y M. Research on the transformation path of farmland protection under the high-quality agricultural development. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(1): 55-64.]
- [20] CHEN W X, YANG L Y, ZENG J, et al. Untangling the increasing elevation of cropland in China from 1980 to 2020. *Geography and Sustainability*, 2023, 4(4): 281-293.
- [21] 许丽丽, 李宝林, 袁烨城, 等. 2000—2010年中国耕地变化与耕地占补平衡政策效果分析. *资源科学*, 2015, 37(8): 1543-1551. [XU L L, LI B L, YUAN Y C, et al. Changes in China's cultivated land and the evaluation of land requisition-compensation balance policy from 2000 to 2010. *Resources Science*, 2015, 37(8): 1543-1551.]
- [22] 陈昌玲, 张全景, 吕晓, 等. 江苏省耕地占补过程的时空特征及驱动机理. *经济地理*, 2016, 36(4): 155-163. [CHEN C L, ZHANG Q J, LYU X, et al. Analysis on spatial-temporal characteristics and driving mechanisms of cropland occupation and supplement in Jiangsu province. *Economic Geography*, 2016, 36(4): 155-163.]
- [23] 李月娇, 杨小唤, 程传周, 等. 近几年来中国耕地占补的空间分异特征. *资源科学*, 2012, 34(9): 1671-1680. [LI Y J, YANG X H, CHENG C Z, et al. Spatial features of occupation and supplement cropland based on topographic factors in China from 2008-2010. *Resources Science*, 2012, 34(9): 1671-1680.]
- [24] 王静, 杨小唤, 蔡红艳, 等. 20 a来中国占补耕地光温生产潜力时空特征. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 126-136. [WANG J, YANG X H, CAI H Y, et al. Spatial-temporal characteristics of light-temperature potential productivity on cropland occupation and supplement in China in the last 20 years. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(1): 126-136.]
- [25] 胡硯霞, 王长青. 汉江流域耕地生产力变化趋势与持续性分析. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(6): 1249-1261. [HU Y X, WANG C Q. Change trend and sustainability analysis of farmland productivity in the Han River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(6): 1249-1261.]
- [26] 张金亭, 董艳超, 叶宗达. 基于地形改进NPP指数的县域耕地产能测算. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 227-234. [ZHANG J T, DONG Y C, YE Z D. Calculation of county-level cultivated land productivity based on NPP index corrected by topography. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(10): 227-234.]
- [27] 闫慧敏, 刘纪远, 黄河清, 等. 城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响. *地理学报*, 2012, 67(5): 579-588. [YAN H M, LIU J Y, HUANG H Q, et al. Impacts of cropland transformation on agricultural production under urbanization and grain for green project in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 579-588.]
- [28] 方修琦, 殷培红, 陈烽栋. 过去20年中国耕地生产力区域差异变化研究. *地理科学*, 2009, 29(4): 470-476. [FANG X Q, YIN P H, CHEN F D. Changing regional differences of grain productivity in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(4): 470-476.]

- [29] 张鹏岩, 庞博, 何坚坚, 等. 耕地生产力与粮食安全耦合关系与趋势分析: 以河南省为例. 地理科学, 2017, 37(9): 1392-1402. [ZHANG P Y, PANG B, HE J J, et al. Coupling relationship and trend of cultivated land productivity and food security: A case study of Henan province. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(9): 1392-1402.]
- [30] 万炜, 邓静, 王佳莹, 等. 基于潜力衰减模型的东北—华北平原旱作区耕地生产力评价. 农业工程学报, 2020, 36(5): 270-280. [WAN W, DENG J, WANG J Y, et al. Evaluation of cultivated land productivity based on potential attenuation model in the dryland farming regions of Northeast and North China Plain. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(5): 270-280.]
- [31] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用. 自然资源学报, 2021, 36(12): 2995-3006. [HUANG X J, ZHANG X Y, LU X H, et al. Land development and utilization for carbon neutralization. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [32] 卢龙辉, 陈福军, 许月卿, 等. 京津冀“生态系统服务转型”及其空间格局. 自然资源学报, 2020, 35(3): 532-545. [LU L H, CHEN F J, XU Y Q, et al. Ecosystem services transition in Beijing-Tianjin-Hebei region and its spatial patterns. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 532-545.]
- [33] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC). 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn>), 2018, Doi: 10.12078/2018070201. [XU X L, LIU J Y, ZHANG S W, et al. China multi-period land use and land cover change remote sensing monitoring data set. *Resource and Environmental Science Data Registration and Publishing System* (<http://www.resdc.cn>), 2018, Doi: 10.12078/2018070201.]
- [34] ABRAMS M, CRIPPEN R, FUJISADA H. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1156, Doi: 10.3390/rs12071156.
- [35] RUNNING S, ZHAO M. MODIS/Terra net primary production gap-filled yearly l4 global 500 m sin grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021, Doi: 10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061.
- [36] 陈万旭, 李江凤, 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. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187. [CHEN W X, LI J F, ZENG J, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2173-2187.]
- [37] 周亮, 党雪薇, 周成虎, 等. 中国建设用地的坡谱演化规律与爬坡影响. 地理学报, 2021, 76(7): 1747-1762. [ZHOU L, DANG X W, ZHOU C H, et al. Evolution characteristics of slope spectrum and slope-climbing effects of built-up land in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1747-1762.]
- [38] 沈润, 史正涛, 何光熊, 等. 基于景观破碎化指数的西双版纳生态安全格局构建与优化. 热带地理, 2022, 42(8): 1363-1375. [SHEN R, SHI Z T, HE G X, et al. Construction and optimization of the ecological security pattern of Xishuangbanna based on fragmentation index. *Tropical Geography*, 2022, 42(8): 1363-1375.]
- [39] 陈万旭, 梁加乐, 卞娇娇, 等. 黄河流域景观破碎化对土壤保持服务影响研究. 地理科学, 2022, 42(4): 589-601. [CHEN W X, LIANG J L, BIAN J J, et al. Impact of landscape fragmentation on soil conservation services in the Yellow River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(4): 589-601.]
- [40] 孙蕊, 孙萍, 吴金希, 等. 我国耕地占补平衡政策主体互动模式探究: 基于政策网络的视角. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(s3): 213-216. [SUN R, SUN P, WU J X, et al. A study on the network analysis of cultivated land requisition-compensation balance policy in China. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(s3): 213-216.]
- [41] 林耀奔, 叶艳妹. 基于政策工具视角的中国耕地占补平衡制度分析. 农村经济, 2019, (5): 45-50. [LIN Y B, YE Y M. Analysis of China's arable land requisition-compensation balance system based on the perspective of policy instruments. *Rural Economy*, 2019, (5): 45-50.]
- [42] 施开放, 刁承泰, 孙秀锋, 等. 基于改进SPA法的耕地占补平衡生态安全评价. 生态学报, 2013, 33(4): 1317-1325. [SHI K F, DIAO C T, SUN X F, et al. Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance based on improved set pair analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1317-1325.]
- [43] 刘兆顺, 杨德明, 王冬艳, 等. 我国耕地异地占补平衡的运行机制. 农业现代化研究, 2005, 26(5): 386-389. [LIU Z S, YANG D M, WANG D Y, et al. Running mechanism for balance of cultivated land's occupation and compensation in different region in China. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26(5): 386-389.]

- [44] 苑韶峰, 李胜男, 杨丽霞. 基于可转移发展权的耕地占补平衡问题新思考. 中国国土资源经济, 2019, 32(2): 47-51.
[YUAN S F, LI S N, YANG L X. A new idea on the issue of the balance of arable land based on transferable development rights. *Natural Resource Economics of China*, 2019, 32(2): 47-51.]

Spatio-temporal differentiation of cropland use change and its impact on cropland NPP in China

YUAN Jin-tao, CHEN Wan-xu, ZENG Jie

(Hubei Key Laboratory of Regional Ecology and Environmental Change, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The spatio-temporal patterns of China's cropland have been profoundly reshaped over the past 40 years, and it is vital to scientifically reveal the spatio-temporal differentiation characteristics of cropland use change and analyze its impact on cropland NPP for accurately judging the utilization situation of cropland resources and ensuring food security in China. However, few studies have focused on the spatio-temporal characteristics of cropland use change and their impacts on cropland NPP in China were still unclear. This study quantitatively analyzed the spatio-temporal differentiation characteristics of cropland use change in China from 1980 to 2020 and its impact on cropland NPP by applying the models of gravity analysis, spatial statistical analysis, and digital terrain analysis. The results were showed as follows: (1) The quantity of transfer-in cropland in China gradually exceeds that of transfer-out cropland during 1980-2020, with the spatial characteristics of south-decreased and north-increased, east-decreased and west-increased, and the gravity center of transfer-out cropland and transfer-in cropland overall moves to Southwest China. (2) Both transfer-in and transfer-out cropland develop to areas with high elevation and slope, and the average elevation and slope of transfer-in cropland is higher than that of transfer-out cropland with the phenomenon of "even cropland decreasing with steep cropland increasing" and "low-elevation cropland decreasing with high-elevation cropland increasing". (3) The fragmentation degree of transfer-in and transfer-out cropland in China has deepened, with the fragmentation degree of transfer-in cropland being higher and the phenomenon of "contiguously reduced and fragmentarily increasing". (4) The conversion of cropland to grassland and forest land was most frequent during 1980-2000, and the phenomenon of returning cropland to forest land and grassland and construction land encroaching on cropland became more obvious during 2000-2020. (5) The cropland NPP in China generally increased during the study period, but declined in several urban agglomerations and their surrounding areas. The study results provide a basis for understanding the process of cropland use change and its impacts in China, and provide scientific support for the refinement of cropland protection policies as well as the safeguarding of food security.

Keywords: cropland use change; digital terrain analysis; landscape pattern index; cropland NPP; China