



现代人地系统科学认知与探测方法

刘彦随^{1,2*}, 刘亚群^{1,2*}, 欧聪^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101

* 联系人, E-mail: liuys@igsrr.ac.cn; liuyaquin@igsrr.ac.cn

2023-04-21 收稿, 2023-06-02 修回, 2023-06-25 接受, 2023-07-17 网络版发表

国家自然科学基金(42293270, 41931293, 42201289)资助

摘要 人地系统是人类活动与地理环境相互联系、相互作用而形成的复杂适应系统, 具有综合性、区域性、复杂性、开放性、动态性特征。人地系统空间识别、类型诊断和强度评估是现代入地系统科学和地理学综合研究的核心内容, 是科学认知人地系统演化过程与机理、服务支撑人地系统协调与可持续发展决策的重要基础。本文基于人地关系地域系统理论和地理学“三主三分”方法, 构建了自上而下的现代人地系统识别-诊断-评估科学认知体系, 综合土地利用、人口密度、夜间灯光指数、感兴趣点等多源空间数据, 利用决策树、空间聚类、人类足迹强度指数等定量模型方法, 开展了2000~2020年中国人地系统地域空间分区、主要类型分类和作用强度分级探测研究。结果表明: (1) 中国人地系统面积占比由53.9%增至54.1%, 基本稳定在54%左右, 空间上呈东南高、西北低的分异特征, 平原地区、耕地和城市集中分布区的占比明显高于山地丘陵区 and 地广人稀地区。人地系统中生活功能区的面积占比由3.61%增至5.24%, 生产和生态功能区占比分别由35.19%和61.20%降至34.66%和60.10%。(2) 快速城镇化和乡村振兴发展促使城市型、村镇型人地系统面积扩大, 分别增长了135.45%和9.59%, 但新增主要源于农业型人地系统; 受生态退耕和耕地扩张共同影响, 农业型和生态型人地系统间存在相互转换, 其面积分别减少1.06%和1.37%。(3) 中国人地系统的人类足迹强度由9.28增至10.25, 增幅为10%, 呈现出高值区扩张、低值区缩减, 人类活动持续加强且空间集聚化的特征。本研究分层次回答了人地系统分布、类型、等级等关键问题, 深化了现代人地系统耦合过程-机理-格局的科学认知, 可为人地系统协调和可持续发展决策提供参考依据。

关键词 现代人地系统科学, 人地关系地域系统, 地域空间识别, 主导类型诊断, 作用强度评估

1 人地关系与人地系统

随着人类活动对地球系统的作用不断增强, 人文过程已逐渐成为驱动现代地表环境变化和入地关系演化的主导因素, 地球系统已进入“人类世”新纪元^[1~4]。工业文明促使人类社会经济发展、科技进步和财富创造达到前所未有的高度, 同时也导致巨大的自然资源消耗和严重的生态环境问题。当今, 社会经济发展正面临日益严峻的土地退化、环境污染、生物多样性减少等

区域性问题, 本质上是人类对自然地理环境施加的影响加剧, 导致人地系统耦合失调、功能失衡的结果表现^[3,5]。近些年来, 未来地球计划(Future Earth)、全球变化研究计划(Global Change Research Program, GCRP)、生物多样性和生态系统服务政府间科学——政策平台(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)、人与自然耦合系统项目(Coupled Human and Natural System, CHANS)、自然与人类耦合系统动力学计划(Dynamics

引用格式: 刘彦随, 刘亚群, 欧聪. 现代人地系统科学认知与探测方法. 科学通报, 2024, 69: 447–463

Liu Y S, Liu Y Q, Ou C. Scientific cognition and detection methods of modern human-earth system (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 447–463, doi: 10.1360/TB-2023-0379

of Coupled Natural and Human Systems, CNH)、人与生物圈计划(Man and the Biosphere Programme, MAB)、联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)等国际性研究计划不断推进,并强调致力于解析人类与自然耦合作用下人地系统演化过程和机理^[1,6-8],探究人地系统耦合发展的优化模式和科学路径,促进实现人地关系协调和可持续发展目标^[3]。因此,深入揭示人地系统的地域空间、主导类型、作用强度及其时空变化过程,既是地理学研究的重要国际科学前沿议题,也是服务于国土空间优化、人与自然和谐共生等国家战略需求的重要科学基础。

自1991年吴传钧^[9]提出人地关系地域系统理论以来,人地关系与人地系统已成为地理学研究的核心主题和解决社会经济发展实际问题的重要命题,认为人地系统是人类社会与地理环境两个子系统相互联系、相互作用而形成的具有一定结构和功能的复杂开放巨系统。在此基础上,相关学者进一步拓展了人地系统的内涵。国内有学者认为,人地系统由人口、资源、环境和发展(population-resource-environment-development, PRED)4个子系统交互作用构成^[10],并进一步拓展为人口、资源、生态、环境、经济和社会(population-resource-ecology-environment-economy-society, PREEES)6个子系统^[11]。也有国外学者将人地系统表述为社会-生态系统(social-ecological system)^[7]、人类与环境耦合系统(coupled human-environment system)^[12]或人与自然耦合系统(coupled human-natural system)^[13]。社会-生态系统包括资源单元、资源系统、管理系统和用户4个核心子系统^[14],可基于网络分析模型揭示子系统间相互作用与互馈的模式与结构^[15],使用弹性理论解析社会-生态系统的动态演化过程与机理^[16]。人类与环境耦合系统研究认为,人类系统与环境系统呈非线性动态耦合关系,可基于稳态转换理论揭示子系统及其耦合系统的相互作用与过程机理^[17],利用暴露-敏感性-恢复力的脆弱性分析框架,从全球-区域-地方等多尺度揭示人类与环境耦合系统的扰动与压力、条件与状态、调整与适应^[12]。人与自然耦合系统具有相互影响与反馈回路、非线性与阈值、意外后果、遗留效应与时滞、弹性、异质性等复杂性特征^[13],可利用包括内耦合、近程耦合和远程耦合的全程耦合框架,刻画人类系统与自然系统间的相互作用及其动态耦合关系^[18]。行星边界、安全公正空间、生态系统服务流、自然对人类的贡献等研究框架也广泛应用于探究人类社会系

统与地理环境系统的相互作用与耦合过程及其带来的人类福祉和环境影响^[19-22]。随着人类活动对地球系统作用的不断加剧,全球变化对粮食安全、生态保护、城乡发展和农户生计等重要领域的影响及其不确定性增强,新时期人地系统协调与可持续发展面临的地理问题愈加复杂,地理学进入系统研究时代^[23],其核心是深化现代人地系统科学研究^[3]。现代人地系统科学是对人地关系地域系统理论模式的传承和发展,包括人地关系认知、人地系统理论、人地系统协调3个循序渐进的有机组成部分,重点研究人地系统耦合机理、演变过程及其复杂交互效应^[3]。现代人地系统科学是现代地理科学与地球系统科学深度交叉的新型学科,深入开展现代人地系统定量探测与模拟分析,已成为新时代推动实现人与自然和谐共生、生态文明建设与可持续发展的重要科学基础。

人地关系是人类社会最基本关系之一,是现代人地系统科学研究的重要内容。随着原始文明、农业文明向工业文明、生态文明的不断演进,科技进步和经济发展促使人类生产力持续提升,人类社会系统对自然资源的利用程度和广度不断增强,地理资源系统由原始的资源丰富、粗放低效利用的资源短缺向合理高效利用的资源平衡发展,人地关系也呈现出协调-冲突-解耦-适应-耦合-协调的演化过程,并具有显著空间异质性、时序阶段性特征。土地利用是链接人类系统与自然系统的关键纽带和反映人地系统耦合的重要指标^[24],土地利用类型和结构随着人地关系的演进而多样化、复杂化,土地系统呈现出由自然生态系统、人为改观系统向土地熟化系统、退化性系统的演化特征^[25],人地系统也呈现出由单一自然生态系统向复合人文-生态系统的转变^[26]。大数据、人工智能等现代信息技术快速发展,促使区域资源要素流动范围扩大和速率增强,科技创新带来的“时空压缩”效应深刻影响着现代人地关系的形式和内涵^[5],人地关系研究由本土思维向全球网络化转型^[27]。全球气候变化、自然灾害频发、生物多样性下降等自然大变局,导致人地系统的扰动加剧和不确定性增加,进一步增强了人地交互作用和入地关系的复杂性^[28,29]。随着全球变化进程中人文因素综合作用不断增强,人们对人类活动与地理环境互馈关系的认知不断深化,围绕人地关系的理论研究经历了由天命论、决定论、或然论、征服论到适应论、协调论的发展。现代人地系统科学将人地系统耦合与交互作用的地表圈层——“人地圈”作为核心

研究对象^[3],更加强调“人”作为主体的主观能动性和改造自然的能力,同时也更加注重“地”的适宜性和可持续性,提倡人类不应试图“征服”自然地理环境,而应当主动认识人地系统转型发展规律,适度开发和合理利用自然资源,科学适应地理环境演变,实现人地关系协调与可持续发展。分层级探测现代人地系统的分布、类型、等级和时空变化特征,是科学认知人地关系及其区域分异、时序变化的重要基础,对推进地球系统科学与可持续性科学的交叉融合、促进区域人地关系协调和人地系统耦合意义重大。

地球系统科学与地理科学的深入发展^[1,30-32],促使人地系统研究热点议题逐步由人地关系认知、人地系统理论构建、系统要素-结构-功能解析、演化规律与驱动机制刻画^[3,9,33-36],发展为复杂人地系统模拟、情景预测与适应策略、人地系统协调与可持续发展^[11,37-41],人地关系地域系统和现代人地系统理论在地理学创新发展和国家重大战略制定实施中的作用与地位也不断提升^[3]。地球系统科学主要研究地球表层巨系统的大气圈、水圈、岩石圈和生物圈等各圈层之间的相互作用过程与机理,重点关注对地球系统的观测与实验、动力学模拟、评价与综合,相关研究愈加强调综合性、系统性和复杂性^[42]。地理科学主要研究地球表层多要素以及自然和人文现象之间的相互作用关系与时空过程,具有综合性、区域性和实践性特征。随着地理问题的不确定性和复杂性日渐凸显,现代地理科学已迈向定量、综合、系统研究的时代^[1,32,43]。地球系统科学与地理科学都注重研究人类社会与自然环境的互馈关系和作用机制,强调地球表层系统的整体性、复杂性和系统性,为深入开展现代人地系统科学研究提供了重要的学科基础。新时代人文地理学、自然地理学、信息地理学深度融合,以及地理学与工程学、管理学等多学科交叉与创新发展,为复杂人地系统的综合解构和定量模拟提供了新契机、新支撑和新要求^[1,44-47]。人地系统相关研究视角、数据和方法都在不断传承、创新、发展^[3,48],呈现出由单要素、简单结构、单功能向多要素耦合、复杂网络结构、多功能权衡协同发展,由单一数据向多源数据融合发展,由传统统计、相关方法向复杂系统模拟方法发展的趋势,更加注重多要素交互、多过程耦合、多数据驱动、多模型刻画下复杂人地系统演化过程的定量模拟和规律挖掘研究^[5,43,49-51]。针对新时期人地系统面临的新问题和新的挑战,现代人地系统科学集成了地球系统科学的基

础性和地理科学的应用性特征,综合天-空-地-网协同观测手段、多源数据、定量探测与模拟模型方法,开展以人地系统耦合与可持续发展为研究核心的交叉融合研究,服务于国际科学前沿、国家重大战略和地方经济建设。

面向全球环境变化、区域可持续发展和地方空间治理的多层级、多目标战略需求,现代人地系统科学亟须构建多尺度、跨区域、贯通式研究体系^[3],从宏观、中观和微观尺度综合揭示人地系统的地域空间差异、主导类型分异与作用强度级别及其时空演化过程与机理,深度解析现代人地系统全要素耦合机理和多尺度传导机制,推动人地系统耦合与可持续发展综合研究。分区识别人地系统空间范围、分类诊断人地系统主要类型和分级评估人地系统作用强度,分层级回答人地系统分布、类型、等级等关键问题,是科学认知人地系统综合性、复杂性和多尺度特征的重要基础,对模拟解析人地系统时空演化过程与机理、探究人地系统耦合与区域可持续发展模式至关重要。然而,目前国内外学者对人地系统的边界认知和空间识别仍未有统一标准,大多数研究仍停留于概念性理论界定阶段,缺乏对人地系统实际物理边界的空间识别^[3]。现有地球表层分类研究大多基于土地利用/覆被^[52,53]、生态系统^[54]等视角开展,虽然乡村地理学领域有学者划分了乡村人地系统类型^[55,56],但仍缺乏对人地系统时空格局及其主要类型的系统诊断。现有研究大多采用人类足迹^[57]、生态足迹^[58]、人类改造度^[59]等方法定量评估人类活动对地球表层环境的影响程度,但仍缺乏从人地系统视角对人类活动作用强度的科学界定和量化评估。为此,本研究基于人地关系地域系统理论和“三主三分”(即主体功能分区、主导类型分类、主要用途分级)方法^[60],构建了人地系统识别-诊断-评估科学认知体系和综合分析框架,集成多源遥感和地理空间数据,综合多种方法模型,开展2000~2020年中国人地系统的地域空间分区识别、主导类型分类诊断和作用强度分级评估研究,深入揭示人地系统分布、类型和等级的区域分异与时序演化特征,为区域人地系统协调和可持续发展决策提供科学依据。

2 人地系统识别-诊断-评估科学认知体系

人地系统是人类活动与地理环境相互联系、相互作用而形成的复杂适应系统,同时也是由自然、资源、生态、环境、人文、社会、经济、技术等全要素

耦合形成的地域综合体^[3,9]。人地系统具有综合性、区域性、复杂性、开放性、动态性,也兼备农业生产、工商服务、生态保护、生活居住等多种功能属性,且系统要素-结构-功能具有演化层级性和空间分异性特征。在复杂人地系统中,人类社会子系统对地理环境子系统的资源开发活动具有一定的利用范围、方式和强度差异,地理环境子系统对人类社会子系统的作用反馈也具有一定的影响区域、类型和程度区别。深入揭示人地系统的空间分布、类型结构、等级次序,成为分层级解析人地系统时空演化机理和探究人地系统耦合协调模式的重要基础,对现代人地系统科学和可持续发展决策具有重大理论和实践意义。因此,针对全球环境变化、区域政策响应和地方工程实践的多层级目标需求,本研究基于人地关系地域系统理论和地理学“三主三分”方法^[60],构建现代人地系统识别-诊断-评估科学认知和实证研究框架体系(图1),自上而下、逐级深入开展人地系统的地域空间分区识别、主导类型分类诊断、作用强度分级评估研究,揭示人地系统的宏观分布格局、中观地域类型和微观等级次序特征,解析一定人地系统从其自然地带(N),到地域类型(A)、交通状况(T)、城乡关系(U),再到乡村资源环境(R)、经济社会发展(E)的分级传导模式(NATURE)、作用机制及其地带性、地域性、地方性分异规律,探究现代人类活动与地理环境的交互作用、关联耦合和互馈关系,科学认知人地系统全要素-多结构-多功能的时空差异、级联效应及其内在机理。

基于“三主三分”方法,构建现代人地系统识别-诊断-评估科学认知体系,旨在定量探析人地系统的空间范围与区域差异,解析人地系统的类型分异与时空演化过程,综合揭示现代人地系统的多尺度、多层级、多过程、跨区域特征,系统刻画人地系统的区域分异与时序演化规律及其自然-人文耦合驱动机理,量化评估人地系统全要素-多结构-多功能互馈作用与级联效应^[5],有效服务于国土空间格局优化与可持续发展、区域协作互补与高质量发展、地方特色治理与人地协调发展的多层级战略目标和实践需求,实现对人地系统的宏观分区综合管控、中观分类科学施策、微观分级精准治理,推动以人地系统耦合与可持续发展为核心的地理学综合研究,促进现代人地系统理论认知科学与工程实践科学的有机融合^[3,61],形成人与自然和谐共生的多尺度人地系统优化格局(图2)。

(1) 分布——地域空间分区识别。人地系统具有区

域性和边界性,其内部多要素的耦合作用过程及其与外部地理环境的动态交互联系都发生在与人类活动密切相关的特定地域。识别人地系统的空间分布和物理边界是科学认知其特征规律和优化调控其结构功能的前提。人地系统由人类社会与地理环境交互作用而形成,地理环境客观存在于地球表层任意空间,因此人地系统空间识别主要依赖于对人类生产开发活动及其影响范围的特征识别。土地利用作为链接人类活动与地理环境的关键纽带,是刻画人地关系的重要指标,常用于识别人地系统的空间范围^[62]。此外,人口分布、夜间灯光指数、感兴趣点(point of interest, POI)分布等表征人类活动影响的多源数据,也常用于识别人地系统的空间分布。本研究以人地关系为纽带,以土地利用为载体,以其他表征人类活动的多源数据为辅助,分区识别人地系统及其不同主体功能区的空间范围,有效揭示人地系统的面积规模和空间分布特征及其区域差异性,为现代人地系统演化研究提供明确空间载体,为区域差异化的人地系统协调和可持续发展决策提供基础支撑。

(2) 类型——主导类型分类诊断。人地系统分类诊断是综合概括和科学认知复杂人地系统的基本手段和有效途径,通常根据其主导因素的属性差异性或相似性,将其划分为具有一定结构和功能同质性的次级单元,相同类型单元的内部特征具有相对一致性,同时保持不同类型间的差异性^[55]。在不同空间地域和时序阶段,人地系统具有差异性的自然地理环境与社会经济属性,导致人地系统要素组成和结构功能的多样性,从而形成不同的人地系统类型分布。因此,在分区识别人地系统地域空间的基础上,可根据人地系统自然与人文属性的差异性或相似性,从自然地域、社会经济、要素结构、功能效应或者综合视角,进一步诊断人地系统的主导类型。本研究根据人地系统结构和功能的特性差异,以土地利用类型为关键指标,分类诊断人地系统的主导功能类型,将其划分为城市型、村镇型、农业型、生态型4种人地系统功能类型,深化人地系统类型分异及其时空演化特征的认知,为类型差异化的现代人地系统耦合和优化模式研究提供科学依据。

(3) 等级——作用强度分级评估。相同的人地系统类型具有相似的系统结构和功能,但由于自然资源禀赋、地理区位条件、人口密度分布、经济发展水平、开发利用程度等方面存在一定差异,导致其功能水平和作用强度具有高低之分。人地系统分级评估是根据

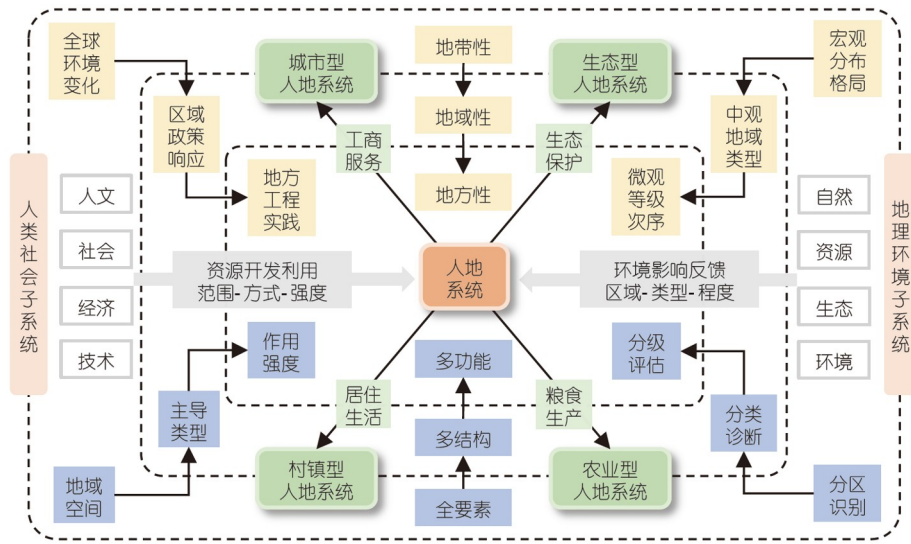


图1 现代人地系统分区识别-分类诊断-分级评估科学认知体系

Figure 1 Scientific cognition system for modern human-earth system zoning identification, classification diagnosis, and grading evaluation

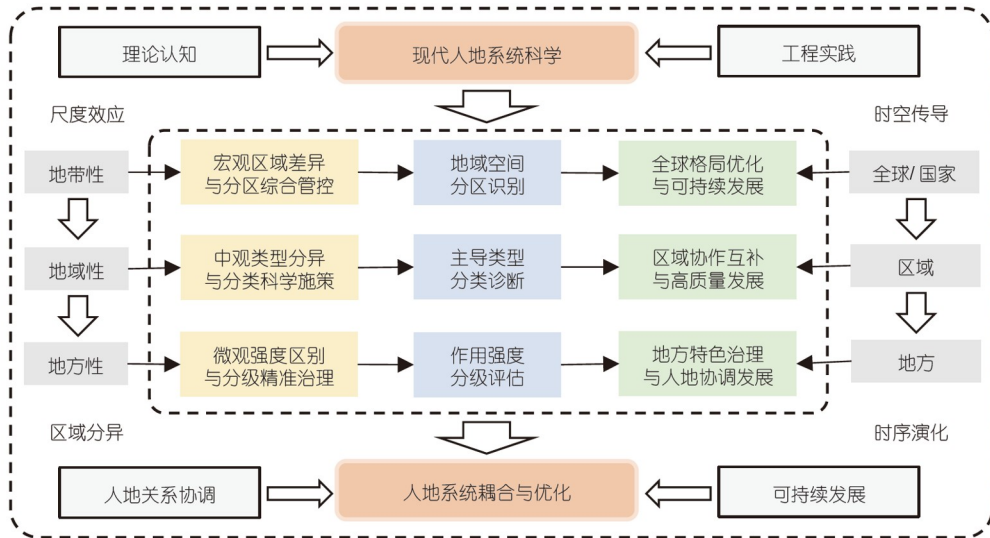


图2 人地系统分区识别-分类诊断-分级评估的多级尺度与时空传导

Figure 2 Multi-level scales and spatio-temporal conductivity of human-earth system zoning identification, classification diagnosis, and grading evaluation

关键属性、用途或功能指标的规模差异和等级区别, 利用密度法、强度法、程度法, 对人地系统的作用及用途大小、功能强弱进行量化评估和程度分级, 综合解析人地系统属性、用途和功能的等级次序特征。本研究基于对人地系统主导类型的诊断, 主要从人类活动影响程度的视角, 综合多源数据构建人类足迹强度指数, 作为人地系统主要用途分级评估的重要指标, 深入揭示人地系统作用强度及其区域差异、类型分异和

时序演化特征, 为实现人地系统协调和可持续管理提供重要支撑。

3 数据来源与研究方法

针对不同研究目标、内容和尺度, 以及人地系统分区识别、分类诊断、分级评估的差异性, 本研究以土地利用为关键指标, 综合人口密度、夜间灯光指数、POI等表征人类活动影响的多源空间数据, 开展近

20年中国人地系统地域空间分区识别、主导类型分类诊断和作用强度分级评估探测研究,并分析其时空变化特征。

3.1 数据源与处理

本研究使用的数据源主要包括土地利用、牧草地分布、人口密度、夜间灯光指数、POI、道路、航道等遥感和地理空间多源数据(表S1)。2000~2020年每5年的30 m分辨率土地利用数据来源于中国科学院环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。该数据集是基于Landsat系列卫星数据,通过人机交互目视解译得到,其总体精度超过90%^[52]。

2000年1 km分辨率牧草地面积占比数据来源于全球农业土地(Global Agricultural Lands)数据集(<http://sedac.ciesin.columbia.edu>)。该数据集是基于统计和遥感数据,计算得到的草地面积占比数据^[63],已广泛应用于人类活动强度评估、放牧强度评估等研究。

2000~2020年100 m分辨率人口密度数据来源于全球人口计划(WorldPop Program)数据集(<https://hub.worldpop.org/>)。该数据是基于人口统计数据、土地利用/覆被、夜间灯光指数、气候、地形、路网、POI等多源数据,利用随机森林算法得到的人口密度栅格数据^[64],用于计算人类足迹强度指数。

2000~2020年1 km分辨率夜间灯光指数数据来源于Scientific Data共享的全球夜间灯光(a harmonized global nighttime light dataset)数据集(<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9828827.v>)。该数据集是综合DMSP-OLS NTL和VIIRS-SNPP两个数据集得到的^[65],已广泛应用于人类活动强度评估、城市边界提取等研究。

POI数据包括城市、乡镇、村庄、公共服务、卫生健康、休闲娱乐等分布数据,来源于开放街道地图(Open Street Maps, OSM)数据库(www.openstreetmap.org),用于计算得到1 km分辨率的POI密度,可有效表征人类活动的作用强度。

道路数据来源于OSM数据库和全球道路开放(Global Roads Open Access Data Set, gROADS)数据集(<https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/groads-global-roads-open-access-v1>),包含了铁路、高速公路、一般公路、小型道路等多种道路信息,计算得到1 km分辨率的道路密度。

航道数据同样来源于OSM数据库,计算得到1 km

分辨率的航道分布密度,用于计算人类足迹强度指数。为了保持数据空间分辨率的一致性,本研究基于聚合分析和重采样方法将多源数据统一至1 km分辨率。

3.2 地域空间分区识别

人地系统空间范围变化会受到一定强度的长期或周期性人类活动影响,形成了诸如城市与乡村居住、基础设施建设、农业耕作、生态造林种草等资源开发利用活动。其他基本无人类活动或受短暂人类活动影响的区域,比如冰川、原始森林、荒漠、无人区等,应属于自然生态系统范畴,不被识别为人地系统分布范围。

土地利用是在持续或周期性人类活动下,对土地资源进行开发利用的复杂社会经济活动,是人类活动改造和影响自然地理环境的直观体现,是有效刻画人地系统交互作用的重要指标,已广泛应用于人地系统或人类活动影响范围的识别^[24,62]。研究表明,全球60%、欧洲86%、南美洲66%、亚洲62%、非洲50%、北美洲47%、大洋洲35%的土地变化受人类活动影响^[62]。本研究以土地利用为主要指标,以表征人类活动的人口密度、夜间灯光指数、POI等多源数据为辅助,分区识别人地系统的地域空间分布,主要包括用于居住与工商业的城市和乡镇建设用地、用于公共服务的基础设施用地、用于交通与运输的道路和航道、用于农牧业生产的耕地和牧草地、用于生态建设的退耕还林还草地等受人类活动影响的区域。

首先基于30 m分辨率的土地利用类型数据,利用ArcGIS聚合(aggregate)分析工具(图S1),以33×33像元为统计单元,计算并重采样得到1 km分辨率的不同土地利用类型占比数据。然后,基于空间叠置分析和条件函数方法,构建多层次决策树,将城乡建设用地和耕地占比大于10%、放牧比例大于10%的牧草地、人工水库和航道、前一期为耕地而本期为林草地的生态退耕用地、人口密度大于10人/km²^[64]、夜间灯光指数DN大于10^[65]、POI密度大于1个/km²的区域,识别人地系统空间范围。最后,基于三生(生活、生产、生态)功能视角,对人地系统及其主体功能区的地域空间进行分区识别。

3.3 主导类型分类诊断

人地系统涉及自然、资源、生态、环境、人文、经济、社会、技术等多种要素,具有不同系统结构和

多种属性功能,其类型划分主要依据自然地域、社会经济、要素结构、功能效应等多个方面的差异性。本研究主要基于人地系统主导功能的差异,以土地利用类型占比为主要指标,以土地利用主导功能类型为分类参考,开展人地系统主要类型的划分和诊断。

首先根据城市建设用地、乡村建设用地、耕地、生态用地(包括林地、草地、水域)对土地利用数据进行重分类,基于聚合分析得到城市功能型、村镇功能型、农业功能型和生态功能型4种土地利用功能类型的面积占比,并将4种类型对应的人类活动影响程度由高至低排列。然后,以3×3格网为统计单位,采用Anselin Local Moran's I 指数(I)^[66]进行像元级空间聚类分析,以识别连片聚集分布的土地利用功能类型。最后,根据土地利用主导功能差异,以土地利用功能类型占比最大且聚集分布为分类依据,分类诊断了城市型、村镇型、农业型、生态型4种主要人地系统功能类型的空间分布,并分析不同类型人地系统的时空变化特征。Moran's I 指数及其显著性的计算公式为

$$I_i = \frac{(n-1)(x_i - \bar{x})}{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{x})^2} \times \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}(x_j - \bar{x}), \quad (1)$$

$$Z_i = \frac{I_i - E[I_i]}{\sqrt{V[I_i]}}, \quad (2)$$

其中, I_i 和 Z_i 分别是像元 i 的Moran's I 指数值和显著性。 x_i 和 x_j 分别是像元 i 的值和其周边像元 j 的值。 $\bar{x}$ 是像元 i 及周边像元的平均值, w_{ij} 是像元 i 和 j 的空间距离权重。 n 、 $E[I_i]$ 和 $V[I_i]$ 分别是统计单元内的像元数、所有像元Moran's I 指数值的均值和方差。当聚集统计值 $I > 0$ 且其显著性 $Z \geq 1.96$ 时,说明该像元呈显著聚集分布特征。

3.4 作用强度分级评估

受差异化的资源禀赋、区位条件、人口密度、经济水平、利用强度等影响,相同人地系统类型存在属性、用途和功能的等级次序区别。本研究主要从人类活动影响程度的视角,集成表征人类活动强度的土地利用、人口密度、夜间灯光指数、POI密度、道路密度、航道密度等多源数据,改进构建人类足迹强度指数(human footprint intensity, HFI)^[57,67],作为人地系统分级评估的重要指标,深入揭示2000~2020年中国人地系统作用强度及其时空变化特征。人类足迹强度指数主要基于多个表征人类活动影响的压力指标及其强度

评分,并利用加权求和方法计算:

$$HFI = \sum_{i=1}^n (x_i \times S_i), \quad (3)$$

其中, HFI 指人类足迹强度指数,其值越高表示人类活动影响强度越大; x_i 和 S_i 分别指的是第 i 种(共 n 种)压力指标的值及其相应的人类足迹强度评分。基于以往研究,本研究人类足迹强度指数计算选择的压力指标及其强度评分计算方法如表S2所示。

4 结果与分析

4.1 中国人地系统空间分布及变化特征

(1) 总体变化。2000~2020年中国人地系统面积总体呈小幅增加趋势,即由517.86万 km^2 增至519.82万 km^2 ,增加了2.26万 km^2 ,增幅为0.4%(图3)。其中人地系统中生活功能区的面积占比由3.61%增至5.24%,而生产和生态功能区的占比分别由35.19%和61.20%降至34.66%和60.10%。2020年中国人地系统面积在土地总面积中的占比为54.1%,较2000年增加0.2%。其中2000~2015年人地系统面积占比增加0.3%,而在2015~2020年期间小幅下降0.1%。这说明近20年中国受人类活动影响的空间范围总体呈小幅扩张,但2015~2020年有所缩减。

(2) 空间格局。中国人地系统面积占比呈现东南部高、西北部低的显著空间分异特征,说明东南部受人类活动影响程度更高。平原地区尤其是耕地和城市集中分布区的人地系统面积占比明显高于山地丘陵地区,耕地集中分布的华北平原、东北平原、长江中下游平原、关中平原和四川盆地的人地系统面积占比较高。中国人地系统中生活功能区主要分布在城市和乡村地区,生产功能区主要集中于平原、盆地和绿洲耕地分布区,生态功能区主要为山地丘陵区的林地和西部草地分布区。

(3) 分省变化。在人口密度大和经济发展快速的北京、天津、上海、江苏、山东、香港和澳门,人地系统面积占比都超过90%;而在地广人稀的新疆、西藏、青海和甘肃,其人地系统面积占比分别为28%、36%、46%和48%(图S2)。2000~2020年中国人地系统面积占比在耕地快速扩张的东北部和西北部增速较大,在南部和中部山地丘陵区呈下降趋势,而在人地系统面积占比极高的平原地区、占比极低的西北无人区和

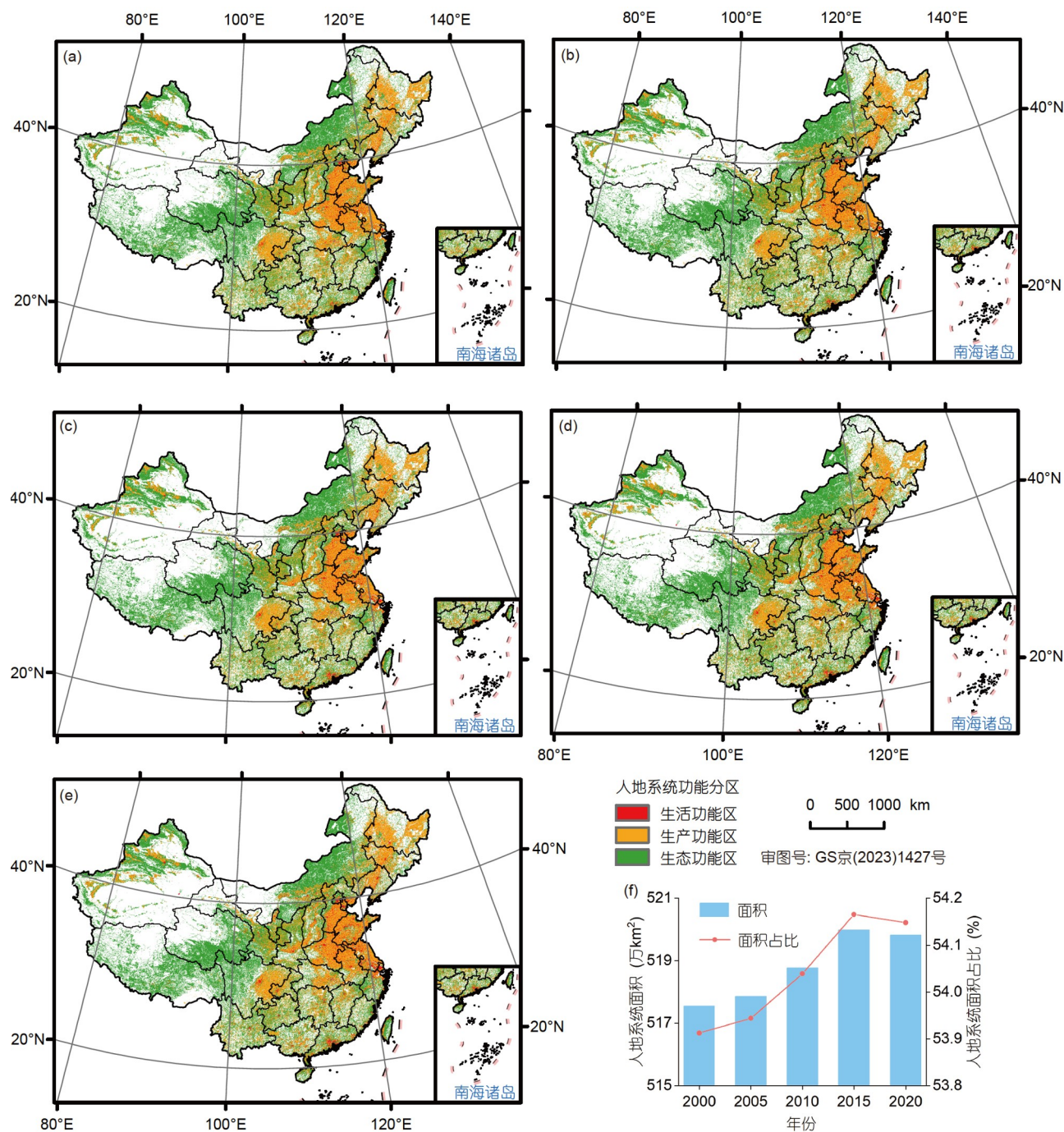


图 3 2000~2020年中国人地系统的时空分布。(a) 2000年; (b) 2005年; (c) 2010年; (d) 2015年; (e) 2020年; (f) 2000~2020年面积及占比变化
Figure 3 Spatio-temporal distribution of human-earth system in China from 2000 to 2020. (a) 2000; (b) 2005; (c) 2010; (d) 2015; (e) 2020; (f) changes in area and proportion from 2000 to 2020

高原地区基本保持不变。2020年北京、天津、上海、江苏和澳门人地系统中生活功能区的面积占比超过20%,吉林、黑龙江、安徽、山东和河南的生产功能区占比超过60%,内蒙古、西藏、青海、新疆、台湾和香

港的生态功能区占比超过70%(表S3)。

4.2 中国人地系统主导类型及变化特征

(1) 总体变化。中国人地系统的功能类型以生态型

和农业型为主, 2020年二者在整个人地系统的面积占比分别为60.10%和34.66%, 而城市型和村镇型人地系统的面积占比仅为2.42%和2.82%(图4)。2000~2020年中国城市型和村镇型人地系统面积及其在总土地面积的占比呈增加趋势, 面积(占比)分别由5.35万km²

(0.56%)和13.33万km²(1.39%)增至12.60万km²(1.31%)和14.60万km²(1.52%)(表1)。受快速城镇化和经济发展影响, 城市型人地系统面积显著扩张135.45%, 未来应加强集约高效利用城市建设用地, 严守城镇开发边界, 遏制城市无序蔓延。尽管乡村人口持续外流, 乡村发展

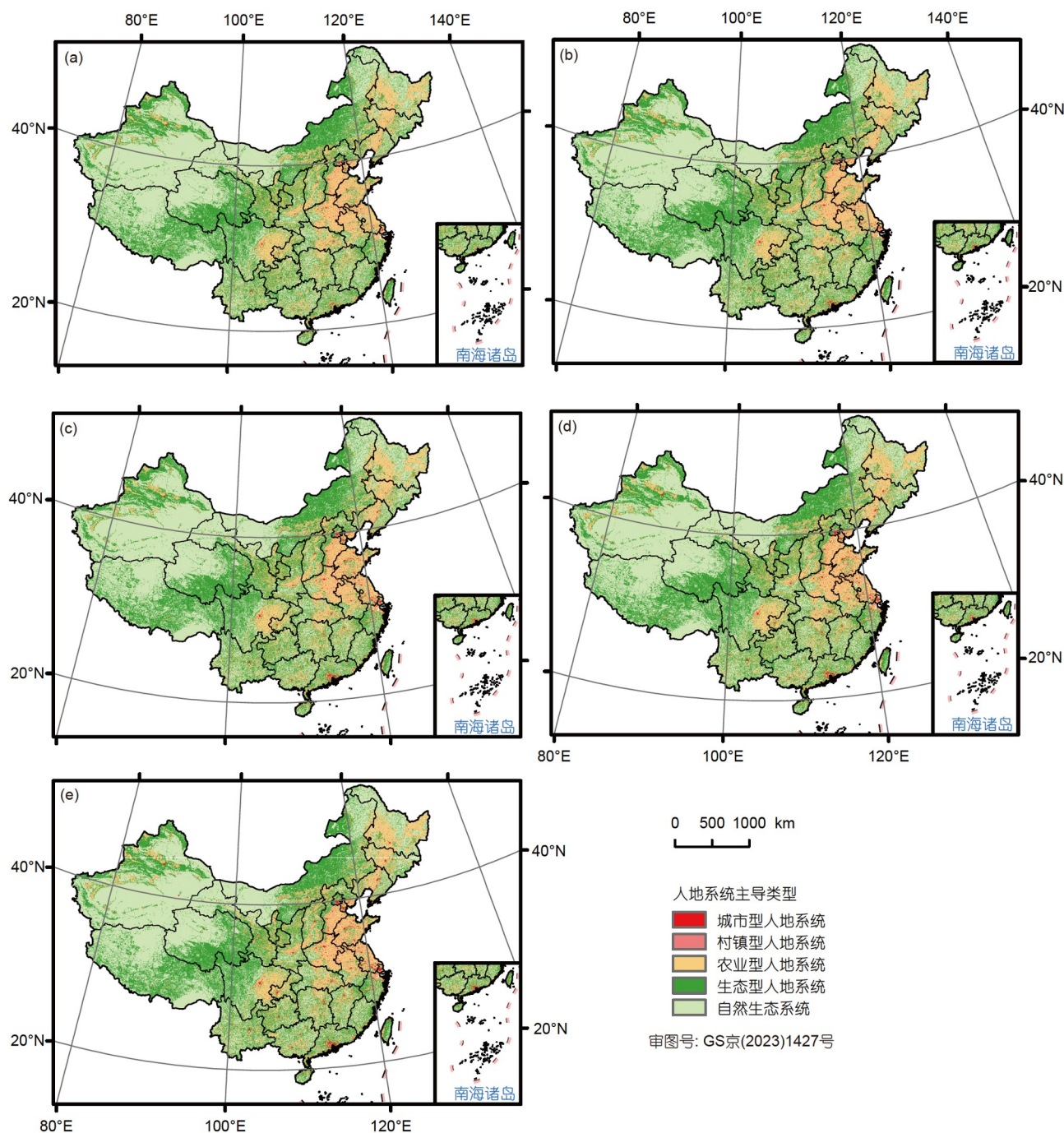


图4 2000~2020年中国人地系统类型的空间分布。(a) 2000年; (b) 2005年; (c) 2010年; (d) 2015年; (e) 2020年

Figure 4 Spatio-temporal distribution of human-earth system types in China from 2000 to 2020. (a) 2000; (b) 2005; (c) 2010; (d) 2015; (e) 2020

表 1 2000~2020年中国不同人地系统类型在总土地面积的占比(%)**Table 1** Area proportion of different human-earth system types in China from 2000 to 2020 (%)

类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
城市型人地系统	0.56	0.70	0.88	1.14	1.31
村镇型人地系统	1.39	1.41	1.45	1.48	1.52
农业型人地系统	18.97	18.89	18.76	18.83	18.77
生态型人地系统	33.00	32.94	32.95	32.71	32.54

仍促使村镇型人地系统面积扩张9.59%，未来乡村振兴应注重集约利用乡村建设用地，促进乡村地域系统转型和人地协调发展。此外，农业型和生态型人地系统面积及其在总土地面积的占比呈小幅下降，面积(占比)分别由182.12万km²(18.97%)和316.75万km²(32.94%)下降至180.19万km²(18.77%)和312.43万km²(32.54%)，面积降幅分别为-1.06%和-1.37%，未来应进一步加强耕地保护和生态建设，促进区域绿色低碳与可持续发展。

(2) 类型转移。2000~2020年中国62.51%(4.53万km²)的新增城市型人地系统源于农业型人地系统(表S4)，城市扩张对作物生产和粮食安全带来显著影响。新增的村镇型人地系统也主要来源于农业型人地系统，其占用面积为2.76万km²，同时也有1.25万km²的村镇型人地系统转变为农业型人地系统，说明乡村发展占用耕地的同时，部分乡村建设用地通过土地整治等方式转变为耕地。减少的农业型人地系统主要转变为生态型人地系统(4.96万km²)，其次为城市型和村镇型人地系统，主要受退耕还林还草等生态建设工程、城市扩张和乡村振兴发展等影响。新增的农业型人地系统主要来源于生态型人地系统和自然生态系统，面积分别高达6.88万km²和4.60万km²，耕地扩张对生态环境的影响巨大，亟须协调好农业生产和生态保护之间的权衡与协同关系。减少的生态型人地系统主要转变为农业型人地系统，其次为城市型人地系统(1.97万km²)。

(3) 分省变化。2000~2020年各省的城市型人地系统面积呈现不同程度增加，其中浙江、福建、江西的增幅超过3倍，江苏、安徽、山东、湖南和陕西的增幅超过2倍，而河南、湖北、台湾和香港的增幅低于50%，澳门几乎不变(图S3)。仅北京和广东的村镇型人地系统面积减少，降幅分别为-11.09%和-10.13%；其他各省均增加，其中西藏、山西和浙江的增幅较大，分别为95.83%、57.30%和50.70%。大部分省份的农业型和生态型人地系统面积呈减少趋势，其中上海、香港、北京、浙江、天津和江苏的农业型人地系统面积降幅超

过-10%，山东、黑龙江、辽宁和天津的生态型人地系统面积降幅超过-10%。新疆和黑龙江的农业型人地系统面积增幅分别为24.95%和7.75%。

4.3 中国人地系统作用强度及变化特征

(1) 总体变化。2000~2020年中国人类活动影响强度持续增加，平均人类足迹强度指数HFI由5.66增至6.28；其中人地系统的HFI由9.28持续增至10.25，增加了0.97，增幅为10%(图5)。HFI>30和HFI=20~30的人地系统面积占比分别由3.39%和0.63%增至4.84%和1.59%，而HFI<4的人地系统面积占比由16.22%降至14.82%(表2)。这说明HFI高值区扩张、低值区缩减，人类活动对地理环境的影响加剧，且呈现空间集聚化。

(2) 分类型变化。中国4种主要人地系统类型的平均HFI均呈增加趋势。2000~2020年村镇型、农业型和生态型人地系统HFI持续增加，分别由17.03、13.31和6.34增至19.24、14.24和6.79，增幅分别为12.95%、7.04%和7.01%(表3)。然而，城市型人地系统HFI波动增加，即由2000年的26.99持续增至2010年的29.04；2010~2015年城市型人地系统面积显著扩张0.26万km²(29.89%)，导致其HFI小幅减少0.84；而后又增至2020年的28.57。

(3) 分省变化。2020年上海的平均HFI最大，高达31.22；北京、天津、江苏、香港和澳门的HFI均超过20；而西藏、青海、新疆和内蒙古的HFI较低，均低于6.54(图S4)。2000~2020年各省HFI呈不同程度的增加，其中浙江和天津增幅较大，分别为23.35%和23.16%。而香港、西藏、青海和黑龙江HFI增幅较小，分别为1.94%、2.58%、3.64%和4.40%。

5 结论与讨论

5.1 结论

人地系统空间识别、类型诊断和强度评估是现代

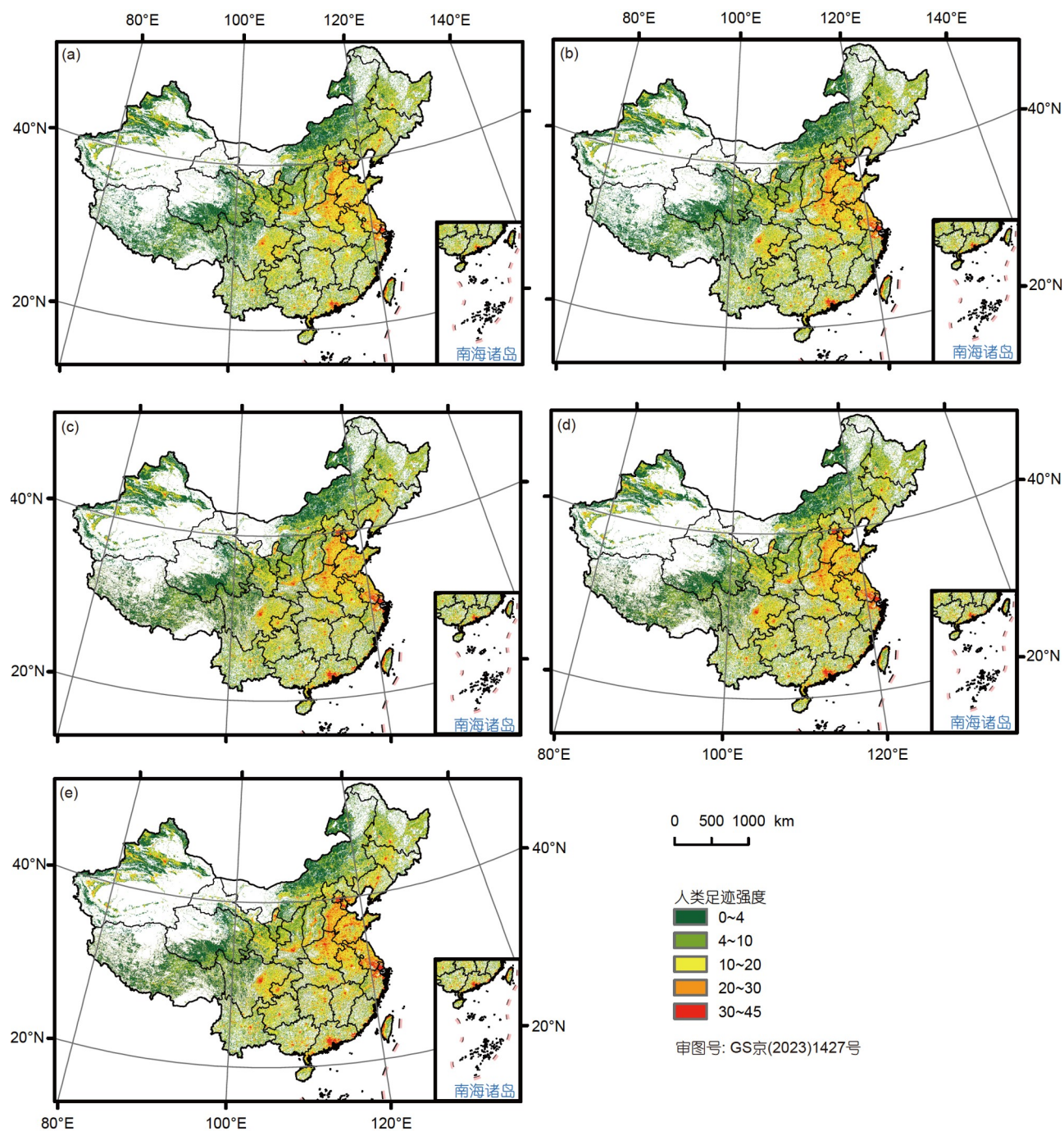


图 5 2000~2020年中国人地系统人类足迹强度的空间分布. (a) 2000年; (b) 2005年; (c) 2010年; (d) 2015年; (e) 2020年
Figure 5 Spatio-temporal human footprint intensity distribution of human-earth system in China from 2000 to 2020. (a) 2000; (b) 2005; (c) 2010; (d) 2015; (e) 2020

人地系统科学和地理学综合研究的重要内容, 是深入探究人地系统演化机理和耦合模式的基础. 本研究基于人地关系地域系统和现代人地系统理论, 构建了自上而下的人地系统分区识别-分类诊断-分级评估科学认知与方法体系, 综合多源空间数据和多种模型方法,

揭示了2000~2020年中国人地系统分布、类型和等级的区域分异与时序演化特征, 可为人地关系协调和可持续发展决策提供科学依据.

(1) 基于“三主三分”方法, 构建人地系统识别-诊断-评估科学认知体系, 凸显了复杂人地系统的综合

表 2 2000~2020年中国不同人类足迹强度的人地系统面积占比(%)**Table 2** Area proportion of human-earth system with different human footprint intensities (%) in China from 2000 to 2020

人类足迹强度	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
0~4	16.22	16.16	16.27	15.08	14.82
4~10	16.77	16.62	16.55	16.77	16.51
10~20	16.88	16.56	16.04	16.67	16.38
20~30	3.39	3.66	4.03	4.38	4.84
30~45	0.63	0.92	1.14	1.25	1.59

表 3 2000~2020年中国不同人地系统类型的人类足迹强度指数**Table 3** Human footprint intensity of different human-earth system types in China from 2000 to 2020

类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
城市型人地系统	26.99	28.42	29.04	28.20	28.57
村镇型人地系统	17.03	17.62	17.96	18.35	19.24
农业型人地系统	13.31	13.50	13.65	13.86	14.24
生态型人地系统	6.34	6.41	6.44	6.67	6.79

性、区域性、多尺度、多层级特征,逐级回答了人地系统分布、类型、等级等关键问题,服务于全球环境变化与可持续发展、区域协作互补与高质量发展、地方特色治理与人地协调发展的多层级战略目标和实践需求,实现了对人地系统的宏观分区综合管控、中观分类科学施策、微观分级精准治理,探索推进了以现代人地系统耦合与可持续发展为核心的人地系统科学及地理学综合研究,对于促进形成人与自然和谐共生的人地系统优化格局至关重要。

(2) 2000~2020年中国人地系统面积占比由53.9%增至54.1%且地域差异明显。人地系统中生活功能区的面积占比由3.61%增至5.24%,生产和生态功能区占比分别由35.19%和61.20%降至34.66%和60.10%。空间上呈现东南部高、西北部低的显著空间分异,平原地区的人地系统占比明显高于山地丘陵地区,耕地和城市集中分布区的占比较高。人口密度大和经济发展快的北京、天津、上海、江苏、山东、香港和澳门的人地系统占比超过90%,而地广人稀的新疆、西藏、青海和甘肃的占比分别为28%、36%、46%和48%。

(3) 中国城市型和村镇型人地系统面积分别增加135.45%和9.59%,新增面积主要源于农业型人地系统,应集约高效利用城乡建设用地,严格控制建设用地规模扩张及其对粮食安全的影响。受生态退耕和耕地扩张共同影响,农业型和生态型人地系统之间存在一定

的相互转换,二者面积分别减少1.06%和1.37%,应因地制宜,切实加强耕地保护和生态建设,高度重视区域发展的巨大差异性。浙江、福建、江西的城市型人地系统面积增幅超过3倍;北京和广东的村镇型人地系统面积降幅分别为-11.09%和-10.13%;上海、香港、北京、浙江、天津和江苏的农业型人地系统面积降幅超过-10%,新疆和黑龙江分别增加24.95%和7.75%;山东、黑龙江、辽宁和天津的生态型人地系统面积降幅超过-10%。

(4) 中国人地系统的HFI由9.28持续增至10.25,增幅10%。HFI高值区扩张、低值区缩减,人类活动进一步加强且空间集聚化。村镇型、农业型和生态型人地系统的HFI分别增加2.21、0.94和0.44;而城市型人地系统HFI波动增加,在其面积显著扩张的2010~2015年期间小幅减少0.84。2020年上海、北京、天津、江苏、香港和澳门的HFI均超过20,其中上海HFI高达31.22;而西藏、青海、新疆和内蒙古的HFI均低于6.54。浙江和天津的HFI增幅分别为23.35%和23.16%,而香港、西藏、青海和黑龙江的HFI增幅分别低至1.94%、2.58%、3.64%和4.40%。

5.2 讨论

(1) 面向新时代人与自然和谐共生的现代化建设,亟须深入推进人地系统分区-分类-分级定量探测与支

撑决策研究。随着人类经济社会对自然地理环境的影响不断加剧,人类活动已成为“人类世”地球环境变化的第三大驱动因素,人地系统演化过程及其机理复杂性、空间差异性日益显现。新时代实施生态文明建设、国土空间规划、城乡融合发展和乡村振兴战略,重在协调和优化多区域、多层级、多部门之间的人地耦合关系和要素配置格局,根本改善经济发展、粮食生产和生态安全等多重功能之间的权衡协同关系,对深化现代人地系统科学研究提出了新要求、新挑战。本研究基于人地关系地域系统理论和“三主三分”方法,创新构建了人地系统分区识别-分类诊断-分级评估科学认知体系,未来研究应进一步完善现代人地系统科学认知和技术方法,集成天-空-地-网协同观测技术获取长时序、细粒度、高精度多源数据(尤其在零散分布、数据资料较少的乡村地域),研制复杂人地系统主体功能分区-主导类型分类-主要用途分级的定量刻画和模拟模型,探索创建从城市群、都市圈、城市圈,到城乡融合体、乡村综合体、村镇有机体、居业协同体的贯通式城乡“圈-体系统”理论与技术体系,在更精细的时空尺度上,综合揭示复杂人地系统的多尺度转换效应、多区域传导机制和多过程耦合机理。

(2) 系统揭示人地系统演化过程-机理-效应。当今人类社会正面临前所未有的全球、区域和地方多层级的环境压力,地球表层系统环境脆弱性、社会危机性日益凸显,迫切需要系统揭示不同区域、不同类型、不同强度人地系统演化过程、驱动机理及其资源环境综合效应,为人地系统耦合和可持续发展决策提供科

学依据。本研究主要基于土地利用系统视角,开展了近20年中国人地系统的地域空间分区识别、主要类型分类诊断和作用强度分级评估,并揭示其区域分异和时序演化特征。未来研究应进一步构建智能化人地系统分区识别-分类诊断-分级评估体系,充分利用多源海量数据和定量模拟技术方法,综合揭示复杂人地系统的演化过程、机理及其效应,系统解析人地系统全要素-多结构-多功能的跨区域、多尺度、流空间耦合特征、时空演变规律及其传导机制,探明人地系统优化调控标准、指标体系及其目标阈值,建成全球/国家、区域和地方人地系统分区管控-分类施策-分级治理的多层级智能化管理体系。

(3) 加快形成人与自然和谐共生的人地系统耦合优化格局。面向全球环境变化、区域可持续发展和空间治理的多目标战略需求,现代人地系统科学亟须构建理论创新与工程实践相结合的综合研究体系,尤其应进一步加强人文地理学、自然地理学、信息地理学深度融合,以及地理学与工程学、管理学等多学科交叉和创新,构建集地理科学、地理技术与地理工程为一体的现代地理科学与工程体系,重点面向全球可持续发展目标(SDGs)和中国式现代化建设愿景,模拟揭示不同区域、不同类型人地系统耦合发展的优化模式和科学路径,探明人地系统要素整合、结构优化和功能提升的优势区、主导类与优先序,加快形成因地制宜、分类指导、有序推进的人地系统耦合与可持续发展模式和优化格局,为促进人与自然和谐共生、推进新型城镇化和全面乡村振兴战略决策提供科学依据。

参考文献

- 1 Xiong J H, Wang J, Zhang Q, et al. The construction of discipline system of science of geography and its significance (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 153–161 [熊巨华, 王佳, 张晴, 等. 地理科学的学科体系构建与内涵. 科学通报, 2021, 66: 153–161]
- 2 Fu B J, Wang S, Shen Y J, et al. Mechanisms of human-natural system coupling and optimization of the Yellow River Basin (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2021, 35: 504–509 [傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 等. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. 中国科学基金, 2021, 35: 504–509]
- 3 Liu Y S. Modern human-earth relationship and human-earth system science (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2020, 40: 1221–1234 [刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学. 地理科学, 2020, 40: 1221–1234]
- 4 Xu G H, Ge Q S, Gong P, et al. Societal response to challenges of global change and human sustainable development (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2013, 58: 2100–2106 [徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策. 科学通报, 2013, 58: 2100–2106]
- 5 Liu Y S, Long H L, Li Y R. Human geography research based on the new thinking of global rural-urban relationship (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2021, 76: 2869–2884 [刘彦随, 龙花楼, 李裕瑞. 全球城乡关系新认知与人文地理学研究. 地理学报, 2021, 76: 2869–2884]
- 6 Diaz S, Demissew S, Carabias J, et al. The IPBES conceptual framework—Connecting nature and people. *Curr Opin Env Sust*, 2015, 14: 1–16
- 7 Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 2001, 4: 390–405
- 8 Fu B J. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2014, 69: 1052–1059 [傅伯杰. 地理

- 学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69: 1052–1059]
- 9 Wu C J. The core of study of geography: Man-land relationship areal system (in Chinese). *Econ Geogr*, 1991, 11: 1–6 [吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统. 经济地理, 1991, 11: 1–6]
 - 10 Mao H Y. Man-Land Svstem and Regional Sustainable Development (in Chinese). Beijing: China Science and Technique Press, 1995 [毛汉英. 人地系统与区域持续发展研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1995]
 - 11 Mao H Y. Theories and methods of optimal control of human-earth system (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2018, 73: 608–619 [毛汉英. 人地系统优化调控的理论方法研究. 地理学报, 2018, 73: 608–619]
 - 12 Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 8074–8079
 - 13 Liu J, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317: 1513–1516
 - 14 Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325: 419–422
 - 15 Bodin O. Collaborative environmental governance: Achieving collective action in social-ecological systems. *Science*, 2017, 357: 659
 - 16 Scheffer M, Carpenter S R, Lenton T M, et al. Anticipating critical transitions. *Science*, 2012, 338: 344–348
 - 17 Bauch C T, Sigdel R, Pharaon J, et al. Early warning signals of regime shifts in coupled human-environment systems. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 14560–14567
 - 18 Liu J G. Integration across a metacoupled world. *Ecol Soc*, 2017, 22: 29
 - 19 Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461: 472–475
 - 20 Robards M D, Schoon M L, Meek C L, et al. The importance of social drivers in the resilient provision of ecosystem services. *Glob Environ Change*, 2011, 21: 522–529
 - 21 Raworth K. A Safe and Just Space for Humanity: Can We Live within the Doughnut? Technical Report. Oxfam, 2012
 - 22 Diaz S, Pascual U, Stenseke M, et al. Assessing nature's contributions to people. *Science*, 2018, 359: 270–272
 - 23 Song C Q, Zhang G Y, Cheng C X, et al. Nature and basic issues of Geography (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2020, 40: 6–11 [宋长青, 张国友, 程昌秀, 等. 论地理学的特性与基本问题. 地理科学, 2020, 40: 6–11]
 - 24 Liu Y S. Optimal regulation mechanism and models of regional land use system (in Chinese). *Resour Sci*, 1999, 17: 60–65 [刘彦随. 区域土地利用系统优化调控的机理与模式. 资源科学, 1999, 17: 60–65]
 - 25 Liu Y S. Optimal Allocation of Regional Land Use (in Chinese). Beijing: Xueyuan Press, 1999 [刘彦随. 区域土地利用优化配置. 北京: 学苑出版社, 1999]
 - 26 Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309: 570–574
 - 27 Tan M H, Li X B. Paradigm transformation in the study of man-land relations: From local thinking to global network thinking modes (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2021, 76: 2333–2342 [谈明洪, 李秀彬. 从本土到全球网络化的人地关系思维范式转型. 地理学报, 2021, 76: 2333–2342]
 - 28 Ramanathan V, Xu Y, Versaci A. Modelling human-natural systems interactions with implications for twenty-first-century warming. *Nat Sustain*, 2022, 5: 263–271
 - 29 Galvani A P, Bauch C T, Anand M, et al. Human-environment interactions in population and ecosystem health. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 14502–14506
 - 30 Chen S P, Zeng S. Earth system science and geo-informatics (in Chinese). *Geogr Res*, 1996, 15: 1–11 [陈述彭, 曾杉. 地球系统科学与地球信息科学. 地理研究, 1996, 15: 1–11]
 - 31 Huang B W. On earth system science and sustainable development strategy (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1996, 51: 350–354 [黄秉维. 论地球系统科学与可持续发展战略科学基础. 地理学报, 1996, 51: 350–354]
 - 32 Fu B J, Leng S Y, Song C Q. The characteristics and tasks of geography in the new era (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2015, 35: 939–945 [傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 新时期地理学的特征与任务. 地理科学, 2015, 35: 939–945]
 - 33 Cai Y L. A paradigm of the research on man-earth relationship: Positive study of territorial system (in Chinese). *Human Geogr*, 1998, 13: 7–13 [蔡运龙. 人地关系研究范型: 地域系统实证. 人文地理, 1998, 13: 7–13]
 - 34 Fan J. Frontier exploration of sustainable process and pattern of human earth system (in Chinese). *Acta Geogra Sin*, 2014, 69: 1060–1068 [樊杰. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索. 地理学报, 2014, 69: 1060–1068]
 - 35 Lu D D. Theoretical studies of man-land system as the core of geographical science (in Chinese). *Geogr Res*, 2002, 21: 135–139 [陆大道. 关于地理学的“人-地系统”理论研究. 地理研究, 2002, 21: 135–139]
 - 36 Zhao M H, Han R Q. Comment on the domestic and foreign status quo of man-land relationship and man-land system (in Chinese). *Areal Res Dev*, 2004, 23: 6–10 [赵明华, 韩荣青. 地理学人地关系与人地系统研究现状评述. 地域研究与开发, 2004, 23: 6–10]
 - 37 Fang C L. The optimal control of regional human-earth system and its sustainable development (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2003, 10: 256–259 [方创琳. 区域人地系统的优化调控与可持续发展. 地学前缘, 2003, 10: 256–259]
 - 38 Liu Y X, Fu B J, Wang S, et al. Research progress of human-earth system dynamics based on spatial resilience theory (in Chinese). *Acta Geogr Sin*,

- 2020, 75: 891–903 [刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 等. 空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展. 地理学报, 2020, 75: 891–903]
- 39 Li X Y, Yang Y, Liu Y, et al. The systematic structure and trend simulation of China's man-land relationship until 2050 (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2021, 41: 187–197 [李小云, 杨宇, 刘毅, 等. 中国人地关系的系统结构及2050年趋势模拟. 地理科学, 2021, 41: 187–197]
- 40 Liu Y S, Qu L L. Land use pattern change and human-earth system evolution in Three Gorges Reservoir Area in recent 30 years (in Chinese). *Resour Environ Yangtze Basin*, 2022, 31: 1664–1676 [刘彦随, 璩路路. 近30年三峡库区用地格局变化与人地系统演化. 长江流域资源与环境, 2022, 31: 1664–1676]
- 41 Zhao W W, Hou Y Z, Liu Y X. Human-natural coupling system for sustainable development: Framework and progress (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2020, 38: 25–31 [赵文武, 侯焱臻, 刘焱序. 人地系统耦合与可持续发展: 框架与进展. 科技导报, 2020, 38: 25–31]
- 42 Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. The emergence and evolution of earth system science. *Nat Rev Earth Environ*, 2020, 1: 54–63
- 43 Song C Q, Cheng C X, Shi P J. Geography complexity: New connotations of geography in the new era (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2018, 73: 1204–1213 [宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵. 地理学报, 2018, 73: 1204–1213]
- 44 Liu Y, Long H, Chen Y, et al. Progress of research on urban-rural transformation and rural development in China in the past decade and future prospects. *J Geogr Sci*, 2016, 26: 1117–1132
- 45 Fu B J. Thoughts on the recent development of physical geography (in Chinese). *Prog Geogr*, 2018, 37: 1–7 [傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考. 地理科学进展, 2018, 37: 1–7]
- 46 Liu C M, Zheng D, Cui P, et al. Innovative development and prospect of physical geography (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2020, 75: 2547–2569 [刘昌明, 郑度, 崔鹏, 等. 自然地理学创新发展与展望. 地理学报, 2020, 75: 2547–2569]
- 47 Zhou C H, Sun J L, Su F Z, et al. Geographic information science development and technological application (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2020, 75: 2593–2609 [周成虎, 孙九林, 苏奋振, 等. 地理信息科学发展与技术应用. 地理学报, 2020, 75: 2593–2609]
- 48 Liu Y S. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2018, 73: 637–650 [刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴. 地理学报, 2018, 73: 637–650]
- 49 Shi P J. Today and future of the dynamics of human earth system (in Chinese). *Earth Sci Front*, 1997, 4: 205–215 [史培军. 人地系统动力学研究的现状与展望. 地学前缘, 1997, 4: 205–215]
- 50 Zhou C H, Wang H, Wang C S, et al. Geoscience knowledge graph in the big data era. *Sci China Earth Sci*, 2021, 64: 1105–1114 [周成虎, 王华, 王成善, 等. 大数据时代的地学知识图谱研究. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 1070–1079]
- 51 Ge Y, Ma T, Pei T, et al. Progress of big geodata. *Sci Bull*, 2022, 67: 1739–1742
- 52 Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2014, 69: 3–14 [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69: 3–14]
- 53 Wu C J. 1:1000000 Land Use Map of China (in Chinese). Beijing: Science Press, 1990 [吴传钧. 1:100万土地利用图. 北京: 科学出版社, 1990]
- 54 Liu Y Q, Lu C H, Fu B J, et al. Terrestrial ecosystem classification and its spatiotemporal changes in China during last 20 years (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2021, 41: 3975–3987 [刘亚群, 吕昌河, 傅伯杰, 等. 中国陆地生态系统分类识别及其近20年的时空变化. 生态学报, 2021, 41: 3975–3987]
- 55 Liu Y S, Zhou Y, Li Y H. Rural regional system and rural revitalization strategy in China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2019, 74: 2511–2528 [刘彦随, 周扬, 李玉恒. 中国乡村地域系统与乡村振兴战略. 地理学报, 2019, 74: 2511–2528]
- 56 Zhou Y, Guo Y Z, Liu Y S. Areal types and their development paths in rural China (in Chinese). *Geogr Res*, 2019, 38: 467–481 [周扬, 郭远智, 刘彦随. 中国乡村地域类型及分区发展途径. 地理研究, 2019, 38: 467–481]
- 57 Venter O, Sanderson E W, Magrath A, et al. Global Terrestrial Human Footprint Maps for 1993 and 2009. *Sci Data*, 2016, 3: 160067
- 58 Costanza R. The dynamics of the ecological footprint concept. *Ecol Econ*, 2000, 32: 341–345
- 59 Kennedy C M, Oakleaf J R, Theobald D M, et al. Managing the middle: A shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. *Glob Change Biol*, 2019, 25: 811–826
- 60 Liu Y S. The basic theory and methodology of rural revitalization planning in China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2020, 75: 1120–1133 [刘彦随. 中国乡村振兴规划的基础理论与方法论. 地理学报, 2020, 75: 1120–1133]
- 61 Liu Y S, Zheng X Y, Wang Y S, et al. Land consolidation engineering and modern agriculture: A case study from soil particles to agricultural systems. *J Geogr Sci*, 2018, 28: 1896–1906
- 62 Song X P, Hansen M C, Stehman S V, et al. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018, 560: 639
- 63 Ramankutty N, Evan A T, Monfreda C, et al. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Glob Biogeochem Cycle*, 2008, 22: GB1003
- 64 Lloyd C T, Chamberlain H, Kerr D, et al. Global spatio-temporally harmonised datasets for producing high-resolution gridded population distribution datasets. *Big Earth Data*, 2019, 3: 108–139
- 65 Li X, Zhou Y, Zhao M, et al. A harmonized global nighttime light dataset 1992–2018. *Sci Data*, 2020, 7: 168

- 66 Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. *Geogr Anal*, 1995, 27: 93–115
- 67 Mu H W, Li X C, Wen Y A, et al. A global record of annual terrestrial human footprint dataset from 2000 to 2018. *Sci Data*, 2022, 9: 176
-

补充材料

- 表S1 人地系统识别-诊断-评估研究的多源数据及属性
- 表S2 人类足迹强度评估的指标及评分
- 表S3 2020年中国各省人地系统主体功能区的面积占比(%)
- 表S4 2000~2020年中国不同人地系统类型的面积转移矩阵
- 图S1 基于ArcGIS的格网或栅格数据聚合分析示意图
- 图S2 2000~2020年中国各省人地系统面积占比
- 图S3 2000~2020年中国各省不同人地系统类型的面积占比变化
- 图S4 2000~2020年中国各省人地系统的人类足迹强度指数

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “现代人地系统科学认知与探测方法”

Scientific cognition and detection methods of modern human-earth system

Yansui Liu^{1,2*}, Yaqun Liu^{1,2*} & Cong Ou^{1,2}

¹ Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

* Corresponding authors, E-mail: liuys@igsnr.ac.cn; liuyaqun@igsnr.ac.cn

The human-earth system (HES) is a complex adaptive system that embodies the interconnection and interaction between human activities and the geographical environment, characterized by a variety of features such as comprehensiveness, regionality, complexity, openness, and dynamics. Socio-economic development is facing increasingly serious regional problems such as land degradation, environmental pollution, and biodiversity loss. In essence, it is the result of the intensified impact of human activities on the earth system, resulting in the coupling disorder and functional imbalance of HES. Therefore, the spatial identification, type diagnosis, and intensity evaluation of HES are critical topics in modern HES science and comprehensive geography. These themes form the foundation for scientifically cognizing the evolution process and mechanisms of HES, as well as for supporting decision-making aimed at HES coordination and sustainable development.

Based on the theory of human-earth relationship areal system and the geographic methodology of “main function-oriented zoning, dominant type classification, and principal purpose grading”, this study constructed a top-down scientific cognition and method system for modern HES identification-diagnosis-evaluation. The study integrated multi-source spatial data of land use, population density, nighttime light index, and point of interest, adopted multiple quantitative methods of decision tree, spatial clustering, and human footprint intensity index, and conducted the geospatial identification, dominant type diagnosis, activity intensity evaluation of the HES in China from 2000 to 2020.

The results indicated that: (1) The area proportion of China's HES has increased from 53.9% to 54.1%, stabilizing at around 54%. Spatially, it was characterized by a differentiation feature of high-values in the southeast and low-values in the northwest. The HES proportion in plain areas, cultivated land, and concentrated urban areas was significantly higher than that in mountainous and sparsely populated areas. The proportion of living functional zone in the HES increased from 3.61% to 5.24%, and the proportions of production and ecological functional zones decreased from 35.19% and 61.20% to 34.66% and 60.10%, respectively. (2) Rapid urbanization and rural revitalization have resulted in an increase in the area of urban HES and rural HES by 135.45% and 9.59%, respectively. However, these increases were mostly from agricultural HES. The agricultural HES and ecological HES have been affected by the Grain for Green Project and cultivated land expansion, resulting in mutual transformation between the two types and the decrease of 1.06% and 1.37%. (3) The human footprint intensity of China's HES has increased from 9.28 to 10.25, with an increase of 10%. This increase was characterized by the expansion of high-value areas and the reduction of low-value areas, indicating the growing and spatial clustering of human activities.

The findings of this study have provided hierarchical answers to key questions such as where are the distributions, what are the types, and what are the grades for HES. The scientific cognition and detection methods of modern HES can deepen the scientific understanding of the coupling process, mechanism, and pattern of HES, and support decision-making for HES coordination and sustainable development.

modern human-earth system science, human-earth relationship areal system, geospatial identification, dominant type diagnosis, activity intensity evaluation

doi: [10.1360/TB-2023-0379](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0379)