

引文格式:袁晓蕾,王超,李柏延,等.长江流域土地利用/覆盖变化驱动力及影响综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(8):1241-1255.DOI:10.13203/j.whugis20210368



Citation: YUAN Xiaolei, WANG Chao, LI Boyan, et al. Review of the Driving Forces and Impacts of Land Use/Cover Change in the Yangtze River Basin[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1241-1255. DOI: 10.13203/j.whugis20210368

长江流域土地利用/覆盖变化驱动力及影响综述

袁晓蕾¹ 王超¹ 李柏延¹ 王伟¹ 陈能成²

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

² 中国地质大学国家地理信息系统工程技术研究中心,湖北 武汉,430074

摘要:长江流域是中国生态和社会经济的重要组成部分,土地利用/覆盖状态正经历着快速的变化。随着遥感技术、物联网、社交媒体的发展,可以获得海量的、多维度的土地利用/覆盖相关数据,围绕长江流域土地利用变化过程、驱动因素和生态响应的研究大量涌现,对长江流域的发展规划和生态保护提供了一定的决策依据。首先梳理了当前长江流域土地利用/覆盖变化相关研究,然后从土地利用/覆盖变化的驱动机制和生态效应两个方面阐述了研究方法和结论,最后从土地利用/覆盖产品差异、驱动因素区域性、生态环境变化过程的复杂性和生态服务价值评估的综合性方面讨论了现有研究面临的困难和挑战,以及未来研究可能的发展方向。

关键词:土地利用/覆盖变化;驱动力;生态效应;长江流域

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2021-07-13

DOI:10.13203/j.whugis20210368

文章编号:1671-8860(2023)08-1241-15

Review of the Driving Forces and Impacts of Land Use/Cover Change in the Yangtze River Basin

YUAN Xiaolei¹ WANG Chao¹ LI Boyan¹ WANG Wei¹ CHEN Nengcheng²

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² National Geographic Information System Engineering Research Center, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Yangtze River Basin is an important part of China's ecology and social economy, and the land use/cover status is experiencing rapid changes. As the development of remote sensing technology, the Internet of things and social media, we can obtain huge, multi-dimensional relevant data of land use/cover, the process of land use/cover, driving factors and ecological response of research, the development of the Yangtze river basin planning and ecological protection provides a decision-making basis. First, this paper reviews the current research on land use/cover change in the Yangtze river basin, and then expounds the research methods and conclusions in terms of the driving mechanism and ecological effects of land use/cover change. Finally, this paper discusses the difficulties and challenges faced by existing researches from the differences of land use/cover products, regional driving factors, complexity of ecological environmental change process and comprehensive evaluation of ecological service value and the possible directions of future researches.

Key words: land use/cover change; driving force; ecological effect; the Yangtze river basin

土地是人类赖以生存和发展的宝贵资源,在人类长期以来的改造利用下,土地利用/土地覆盖发生剧烈的变化,土地利用强度也日益增大,

对土地不合理的开发利用导致了气候变化、生物多样性下降和环境污染等问题^[1],影响人类社会的可持续发展。1995年,国际科学联合会发起的

基金项目:国家自然科学基金(41890822);国家重点研发计划(2018YFB2100503)。

第一作者:袁晓蕾,硕士,主要从事土地利用/覆盖变化及深度学习相关研究。xlyuan@whu.edu.cn

通讯作者:王超,博士,副教授。c.wang@whu.edu.cn

国际地圈与生物圈计划和国际科学联盟理事会联合国际社会科学联盟理事会发起的全球环境变化中的人文计划联合提出土地利用与土地覆被变化研究,该计划侧重于土地利用/覆盖变化规律、驱动机制以及与生态系统相互作用的研究。经过20多年的发展,土地利用与土地覆被变化研究在全球各国广泛开展,研究领域包括多尺度的土地利用/覆盖变化过程、驱动机制和生态效应等方面^[2]。

目前土地利用/覆盖变化研究仍存在一些为题。在数据方面,由于数据的来源、精度及处理方式存在差异,研究结果缺乏可比性;在驱动因素方面,部分土地利用变化的驱动因素难量化,空间尺度难统一,由于驱动因素的强度、作用方式和效果不同,模型缺乏通用性;在生态效应方面,气候、水文和生态多过程耦合,影响机制复杂,研究方法大多不具备普适性。

长江是中国第一大河,具有多样的生态环境,是全球生态最丰富的区域之一,同时也是连接中国东中西部的黄金水道^[3]。长江流域仅覆盖了中国20%的陆地面积却养育超过30%的人口。由于流域跨度范围大,因此上、中、下游之间经济发展不均衡且自然分异明显。在中国经济迅速发展和城市化进程增速的背景下,长江流域多数城市的土地开发强度远超全国平均水平,面临着土壤流失、中下游湿地面积减少、湿地生态系统退化、生态环境污染等挑战^[4]。中国也出台了相应的生态恢复政策,如天然林保护工程和退耕还林工程等,长江流域的植被

得到一定恢复。在经济发展和政策实施的双重影响下,长江流域的土地利用结构发生了明显的变化。

本文系统梳理了长江流域的土地利用/覆盖变化相关研究,分析了土地利用/覆盖变化情况,归纳了产生这些变化的主要驱动因子和变化带来的生态效应,总结了长江流域的土地利用变化的主要研究方向和方法,为未来长江流域的相关研究提供依据。

1 长江流域土地利用/覆盖变化情况

由于空间数据的缺失,中国20世纪80年代之前的土地利用/覆盖变化研究大多仅使用统计资料分析^[5-6],现在已逐渐转变为利用基于遥感影像^[7-9]获取土地利用/覆盖数据,建立土地利用转移矩阵,并借助相关指数分析土地利用/覆盖的变化情况。众多研究中,由于基础研究数据、土地利用分类体系和研究的时空尺度差异,部分实验结果可能稍有差异。为了便于对比,本文参考众多研究以及《土地利用现状分类》国家标准,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、建设用地、水域、湿地、园地和未利用地8个大类。

长江流域的土地利用/覆盖以耕地、林地和草地为主,变化较大的土地利用类型为建设用地、未利用地、耕地和草地^[10-12]。其中,建设用地、草地和水域增加,未利用地和耕地减少,整个长江流域较为明显的变化为耕地的减少和建设用地的增加^[13-21]。长江流域1990—2015年土地利用/覆盖在不同时期的具体变化情况如表1所示。

表1 长江流域1990—2015年土地利用/覆盖变化情况

Tab. 1 Land Use/Cover Change in the Yangtze River Basin from 1990 to 2015

土地利用类型	1990—2000年 ^[10,19-20]	2000—2010年 ^[3,18-19,21]	2010—2015年 ^[3,18-19]	时相变化
耕地	减少	减少速度加快,主要转化为建设用地、水域和林地。长江三角洲地区和中西部地区省会城市耕地减少明显,但鄱阳湖地区耕地面积增加。	减少,水田在中下游减少较多	减少速度加快
建设用地	增长,长江上中游交界处增长明显	快速增长,主要由城镇周边耕地和林地转换。长江三角洲和中西部较大省会城市增长明显。	增加,中下游城镇扩张速度稳定,上游城镇扩张加快	增长速度加快
林地	减少	增长,主要由耕地和草地转换。长江上游如青海、重庆、四川和贵州等地区明显增长,但在长江中下游减少	增加,上中下游均有增加	先减少后增加
水域	增长	增长,主要由耕地和未利用地转换。长江中游地区增长明显	增加,上中游增加,下游减少	持续增长
草地	长江上游增加,长江中下游减少	减少,主要转化为林地	减少,上中游增加,下游减少	持续减少
未利用地	减少,长江源区增加,主要由草地转化	减少	减少,上游减少速度明显加快	减少速度加快

2 主要驱动因素

导致土地利用/覆盖变化的因素一般分为自然因素和人类活动。自然驱动因素在长时间尺度下主导土地的空间格局,变化较为缓慢且稳定,产生的影响有限^[13-15]。人类活动持续改变着地球生态系统,是全球范围内土地利用/覆盖变化最主要的驱动因素^[16]。

土地利用/覆盖变化驱动力的研究方法大致分为定性分析和定量分析两种。定性分析多是在详细解析土地利用/覆盖变化的基础上,使用理论及实践经验进行区域案例对比和相关因素分析得到驱动因子,定性分析在早期的驱动机制研究中使用较多。刘纪远等^[7]指出影响中国近几十年四川盆地和东南沿海地区建设用地扩张、南方水田面积显著减少和中西部地区林地面积增加的主要驱动因素为经济发展和政策调控两方面;谢高地等^[17]将人口和土地利用视为整体,认为人口数量是最主要的全球土地利用/覆盖变化的驱动因素;孔令桥等^[8]通过计算2000—2015年长江流域的土地利用变化情况,指明生态系统变化的驱动力众多且贡献程度跟地区有密切关联,长江上游土地利用变化主要驱动力为生态恢复工程,长江中游主要驱动力为城市扩张,其次为生态保护工程,而长江下游生态系统变化的主要驱动力是侵占了耕地和水域的城镇化,其次是占用了水域的水资源和农业的开发;何亮等^[12]计算了2000—2015年长江流域及其经济带的土地利用/覆盖变化情况,分析指出由于城镇化发展占用大量耕地的问题在长江下游尤为突出;吴健等^[18]研究表明黄浦江上游2000—2015年主要驱动力是区域发展情况、人口变化和政策,其中,城市化和工业化增加了城镇用地面积,环境政策影响了绿地面积,水源保护区的土地利用情况受到政策和城市化双重作用影响。

为了克服定性分析缺乏客观依据的缺点,统计分析和建立模型这两类定量分析方法在驱动机制研究方面得到了广泛应用。基于统计数据的定量分析主要有相关性分析^[19-23]、主成分分析^[23-24]、回归分析法^[25-27]和地理探测器^[13,28]等方法。杨阳等^[14]研究表明长江流域景观格局变化的驱动因素为城镇建设与经济发展、人口结构和工业污染;孔蕊等^[21]发现长江流域生态工程实施可能是引起2000年后森林碳储量显著增加的原因;胡碧松等^[30]研究表明1995—2015年长江经济

带土地利用变化主要驱动因素为人口变化、经济发展和城市化水平等。对长江流域的子流域及部分城市的研究结论也是类似的。近几十年长江中游地区土地利用主要驱动因素为社会经济因素中的人口、国内生产总值、城市化水平及三大产业产值^[21],受到自然条件的影响较弱^[13]。长江三角洲地区土地利用变化的主要驱动因素为人口增长、城镇化和经济总量的增加^[21]。

统计分析的方法主要是通过数据驱动,缺乏驱动机制方面的分析。近年来,部分学者采用系统动力学模型^[29]、元胞自动机^[30-32]、土地利用变化模型^[33]和综合模型等开展驱动机制的研究^[34]。但在长江流域,驱动机制建模的研究较少,且常与土地利用变化模拟研究相结合。本文将长江流域的土地利用/覆盖变化的驱动因素总结为人口、经济发展和政策调控3个主要方面。

2.1 政策调控驱动

中国的部分国家政策对土地利用结构产生了重要的影响,主要是经济发展、粮食安全和生态环境方面的政策。在改革开放后,中国相关政策经历了由国土开发、发展经济到开发与保护并重的转变^[6],伴随着这些政策的实施,建设用地、耕地、林地、草地和水域产生了明显变化。

在国家层面上,1988年提出的“西部大开发”和2004年提出的“中部崛起”等区域经济发展战略加速了经济发展和人口流动,建设用地扩张。在粮食安全方面,1997年出台的耕地占补平衡政策促进了其他土地利用类型向耕地的转换。2004年起,国家出台的一系列惠农政策实施提高了农民耕种积极性,影响了耕地利用强度^[35],同时限制了建设用地的快速增长^[36]。在生态方面,2001年,国家启动六大林业重点工程,以退耕还林、还湖、还草工程为代表的国家林业重点工程和生态保护工程的实施,切实增加了林地面积,部分草地生态系统得以恢复,水域面积得到保证^[11]。有研究表明,21世纪初的10年是国家实施此工程以来土地利用/覆盖变化最显著的10年^[37]。

对于长江流域,在经济发展方面,2000年以后长江沿岸地区纷纷提出各自的经济发展战略,包括2007年的成渝经济区发展战略、2009年的湖北两圈一带战略和2018年的长江三角洲发展战略等,在这些战略的引导下,长江流域的经济飞速发展,城市化水平快速提高,造成了土地利用/覆盖的急剧变化^[38]。在粮食安全方面,改革开放

后至20世纪90年代初期,政府鼓励开垦荒地和围湖造田导致耕地面积增加。在生态环境方面,20世纪90年代末国家重点实施“平垸行洪”“退田还湖”和“移民建镇”等多项工程,促进了水域面积的恢复,水域增加与退田还湖政策还和2011年开始的三峡蓄水有关^[11]。有研究表明,赣江流域因退耕还林、还湖和还草政策,土地覆盖发生变化,生态环境改善^[39]。1998年以来的退耕还林工程,2000年以来的生态防护林和库周造林绿化等工程实施后10年间,三峡库区大量耕地和草地转换为林地,贵州和安徽省等地区林地有明显增加^[40];孔蕊等^[21]采用相关性分析研究表明,长江流域生态工程实施是引起2000年后森林碳储量显著增加的原因;孔令桥等^[3]研究表明,生态工程为2000—2015年长江流域生态系统变化的主要驱动力之一。

2.2 经济发展驱动

快速工业化和城市化进程也伴随着社会经济发展,因此城镇化的发展伴随着人口迁移、建设用地扩张和产业结构调整,这给城镇和乡村带来了不同的土地利用方式和格局的变化^[41]。

对于乡村而言,城市化导致乡村的经济地位下降和产业结构调整,乡村经济结构的重塑导致土地利用方式和格局的变化^[41]。乡村经济结构调整导致农业用地向果园、畜牧业和水产养殖等用途转变,因此出现耕地转换为园地、林地、草地和水域的现象;经济收益的差异导致耕地等农业用地向城市和工业建设用地转移,部分农村出现空心村和建设用地闲置现象。城镇建设用地和耕地都需要在地形平坦、交通便利和具有良好水资源的地带发展,必然存在着一定的用地竞争^[3],大量优质耕地被建设用地占据,坡地和陡坡地的开垦增加,林地和草地因被破坏而减少,大量未利用地转化为林地、草地和耕地。

在城市中,随着城市化水平提高,城市基础设施加强和城市用地的逐年增加,居住用地和公共设施用地增加^[41]。建设用地增加是城市扩张的直接体现,城市化直接推动了城镇建设用地的增长,间接导致了耕地面积的变化。随着城镇化加快,长江流域的多数省市的土地开发强度高于全国平均水平,孔令桥等^[3]研究表明,2000—2015年长江流域由于城市化水平的加速,大量耕地转换为建设用地,部分林地、水域和草地也被建设用地侵占,城镇化对土地利用/覆盖变化的贡献比达到48%,是长江流域土地利用变化的主要驱

动力。

2.3 人口驱动

众多人类活动中,人口被认为是最具活力的土地利用/覆盖驱动因素,是导致土地利用/覆盖发生变化的重要原因。人口影响土地利用/覆盖主要表现为人口变化引起耕地和建设用地变化。人口增加必然导致对粮食、住房和公共基础设施的需求提升,从而导致耕地和建设用地扩张,但建设用地的增加又会导致优质耕地减少,耕地增加可能导致林草地被破坏而减少。谢高地等^[17]提出了由人口、耕地、草地和森林4个因子构成的以人口为中心的人地关系系统来概括这一现象。

众多研究证明了人口变化对耕地和建设用地的影响。随人口数量变化,供人类生产生活所需的耕地资源数量不断变化^[42],为缓解人口问题,长江流域的农业开发经历了由粗放型垦殖到转变土地利用方式的变化^[43]。石瑞香等^[44]认为人口是农牧交错区耕地变化的最大驱动力。长江流域人口分布不均,绝大多数分布在海拔500 m以下的沿海沿江地区,长江上游人口稀少,中游分布较为均匀,下游人口密集。长江上游的川渝地区、长江中游的平原地区和长江下游的长江三角洲地区是中国重要的城市群聚集区域^[45],长江三角洲地区人口向城市群和中心城市聚集的趋势明显^[46]。研究表明,1999—2020年,长江经济带江苏段的人类活动和建筑物指数间呈现正相关关系^[47]。

3 生态效应

土地利用/覆盖变化不仅直接影响地表覆盖情况,同时也给生态系统中的大气、水文循环、物质循环和能量交换等过程带来较大影响,进而导致生态系统的过程和功能的变化^[47-48]。本文针对土地利用/覆盖变化对气候、水文水资源和生态系统服务3个方面的影响及研究进行分析。

3.1 气候变化

以全球变暖为主要特征的气候变化对人类的可持续发展带来挑战,众多研究表明,人类活动造成的土地利用/覆盖气候变化是全球变暖等气候问题的主要原因之一^[49-50]。在地球生物物理过程中,土地利用变化通过改变区域的地表反射和蒸散发对气候产生影响,不仅改变局部的气温变化,还可以通过大气环流影响区域降水,融合气象要素后,其对空气污染物空间分异特征的形成也有显著贡献^[28]。在生物地球化学过程中,土

地利用/覆盖变化通过影响大气中温室气体含量来改变碳循环过程,导致气候变化。

在研究方法上,土地利用/覆盖对气候影响相关研究主要分为观测研究和模拟研究两方面^[51-54],观测研究主要使用统计学方法,如回归分析和相关性分析等,定量评估监测数据和目标资料的关系,揭示土地利用/覆盖变化对气候的影响。尹梦晗等^[55]使用 Logistic 回归模型研究了武汉市气候变化与土地利用的响应,发现建设用地分布与热岛效应分布具有一致性;时子童等^[56]采用最小二乘法研究长江三角洲城市群 1980—2009 年城市扩张对气候的影响,发现城市扩张导致区域温度的增高;李保妮等^[57]采用线性回归分析研究长江中游城市群土地利用/覆盖变化对大气湿度的影响,结果表明城市扩张会导致大气湿度降低。在观测研究方面,由于观测资料周期和密度选取不一致等问题,研究结果可能会受影响^[51-53]。现有很多研究由于未考虑观测序列均一性的问题,存在着较多争议。并且观测研究很难将土地利用/覆盖造成的局部气候变化从全球气候变化影响中剥离。针对这一问题,有学者提出观测资料减去再分析方法^[57],利用观测资料和分析数据的趋势差值表明土地利用/覆盖对气候的影响,该方法广泛应用于当前研究中,但仍无法排除温室效应等其他因子影响。

模拟研究中,现有的研究多采用基于全球气候模式^[58-59]或者区域气候模式^[50,53,60-62]的方法。曾小凡等^[59]采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第四次报告的 12 种全球气候模式预测了 3 种排放情景下 2011—2050 年长江流域气候变化情况,结果表明气温呈现增加趋势;郝振纯等^[60]评估了 IPCC 第四次报告的 22 个全球气候模型在长江流域对气温和降水的模拟能力,结果表明不同模型模拟能力具有差异,大部分模式对长江流域模拟状况有待提高。与全球气候模式相比,区域气候模式在空间分辨率、中小尺度的物理过程和局部气候模拟描述上更加精确,可以细致地描述区域气候特征^[50,62-63]。在长江流域的研究中,众多学者选择区域气候模式对长江流域气候进行模拟。曹丽娟等^[51]采用区域气候模式(regional climate model, RegCM3)分析了 1987—2001 年土地利用/覆盖变化对长江流域的水文影响,发现土地利用的改变使夏季长江中下游地区降水增多;高学杰等^[62]采用 RegCM3 区域气候模式模拟

中国 1987—2001 年土地利用对气候的影响,结果表明植被的变化导致冬季长江以南降水减少,气温降低,长江以北降水增加;陶辉等^[61]采用区域气候模式模拟了长江流域气温和降水变化,指出长江流域 2016—2035 年相对 1986—2005 年气温升高 0.6 °C,年降水量减少。模拟研究比较依赖高分辨率数据,而且模型参数具有不确定性。此外,由于模拟模式的物理过程、适用范围、实验设计条件和使用数据的差异,一些研究结果之间存在显著差异。

3.2 水文过程

水文过程机理复杂,不仅与地表的各种地理要素密切相关,还与农业开发和城市化等土地利用变化过程有着高度的相关性^[64-65]。土地利用变化的水文响应是全球变化的重要研究内容之一,大量研究表明,土地利用变化是水文变化的主要驱动因素之一。

土地利用/覆盖通过改变流域下垫面影响水循环过程最终影响水文过程。土地利用/覆盖变化对水文过程的影响是通过两方面实现的^[66],一方面是改变地表的性质,如粗糙度、植被叶面积指数和反射率等影响了冠层截留、蒸发和入渗等水文过程;另一方面是引起太阳辐射能量的重新分配,导致潜热通量变化。土地利用/覆盖变化对水文效应的影响如表 2 所示。

表 2 土地利用/覆盖变化对水文效应的影响^[66-67]

Tab. 2 Influence of Land Use/Cover Change on the Hydrological Effect^[66-67]

土地利用/覆盖变化	地表径流	径流系数	蒸散发	洪涝	水土流失	水质
林草地破坏	增加	依地区而定	依地区而定	增加	增加	下降
建设用地扩张	增加	增加	减少	增加	增加	下降
围湖造田	增加	增加	减少	增加		下降

由于径流能直接表达流域当前生态状况,也能用来间接反映土地利用/覆盖变化对水文过程的影响^[66-67],目前相关研究较多。众多土地利用类型中植被、建设用地和水域对水文过程的影响较大。森林对水文的影响主要是通过冠层蒸散发和对降雨再分配产生的^[66,68],大面积林地破坏会使汛期流量增加,枯水期流量减少,造成流域严重的水土流失。湿地的破坏降低了湿地对雨水的缓冲和储存作用,土壤保持水分能力下降,蓄洪能力降低,洪水持续时间缩短并且洪峰增加,加大了洪涝的频率和破坏强度。建设用地的

扩张使不透水面增加^[69],产汇流机制被改变,总径流量增加,洪涝灾害加重。

在水质方面,土地利用/覆盖变化主要通过非点源污染对水质造成影响^[49]。土地利用结构的变化可能会破坏原有流域的生态功能,影响水体之间的养分交换,降低水环境容量和对污染物的稀释能力,间接导致水质恶化。农业生产使用大量的化肥农药,流域内农业非点源营养物质排放量持续上升。化肥的使用成为水体富营养化的主要原因,傍湖而建的工厂和养殖场所排放的废水也加速了水体污染和富营养化的过程。城镇化使城市人口急剧增加,极大地影响了土地利用结构。大量的土地转化为建设用地,由城镇化产生的污水已造成世界性水污染^[70]。

在水量方面,由于耕地扩张和工业的发展,用水量增加,水域面积的减少导致产水量减小。草地和森林的开采会加剧下游的洪水泛滥,增加河流流量,影响降雨的均匀分配,一定程度上增加了流域的产水量。林地面积减小还会引起水土流失,增加湖泊的沉积量,从而减弱湖泊蓄水能力。建设用地的扩张增加了不透水面面积,增大了地表径流,从而增加了流域产水量。有研究表明三峡库区建成后,库区周边耕地、林地和草地面积减少,水域和建设用地面积增加,自库区蓄水以来库区水质下降^[71]。

土地利用/覆盖变化对水文过程影响的研究大致可以分为3个阶段^[66],第一阶段采用流域实验法,主要针对小流域森林变化造成的水文效应,通过流域实验获取水文资料后,大多进行方差分析、主成分分析和回归分析等来研究土地利用/覆盖变化对水文过程的影响。吴东等^[72]采取小区对照试验的方法研究三峡库区的小流域土地利用变化和养分输出之间的关系。但早期的流域试验法存在试验周期长、难以在大尺度流域上实施的问题,由于研究区域和周期不同,气象和地理等流域条件也不尽相同,各项指标的测量方法和测量误差都可能影响最终结论。第二阶段多采用水文特征参数时间序列法研究小流域森林变化或中小尺度土地利用/覆盖变化对地表径流的影响。吕文等^[73]通过获取长时间序列的地表基本参数研究太湖流域土地利用变化对流域生态耗水量的影响。但是,特征变量时间序列法仅适用于下垫面均匀、降水和土地利用/覆盖空间差异小的流域,且缺乏机理方面的描述,仅通过特征参数的变化趋势判断土地利用/覆盖变

化的水文响应可能造成误判。第三阶段,遥感技术能够获取大尺度水文所需的关键数据后,基于流域水文模型的研究逐渐兴起。流域水文模型分为概念模型和分布式物理模型,不同的概念模型具有不同的模型结构和参数,但无法从机理上考虑降水和下垫面等因素对径流的影响。分布式水文模型具有一定的物理基础,可以从机理上获得一定程度的解释,而且可以灵活调整土地利用/覆盖变化情景,模拟不同土地利用/覆盖变化下的水文响应,成为研究土地利用/覆盖变化水文响应的重要方法,常见分布式水文模型有以地形为基础的水文模型^[74-75]、分布式水文模型^[76]和土壤和水分评价工具(soil and water assessment tool, SWAT)^[77]等,其中SWAT模型结构和计算过程适合较大流域^[65],被广泛应用于长江流域的长时间序列径流模拟的研究中。孙占东等^[78]使用SWAT模型模拟长江流域土地利用/覆盖变化的水文效应,发现林地增加会对地表径流、蒸散和基流产生较大影响;曹隽隽等^[79]使用SWAT模型模拟江汉平原主要流域径流量,结果表明随降雨减少,土地利用变化对径流量的影响增加;郭强等^[39]通过SWAT模型研究表明,赣江流域1960—2017年由于实行退耕还林、还湖、生态林保护、兴修水利设施等,径流系数上升,河道水源涵养能力上升,水利设施的调峰补枯效果显著。分布式水文模型包含参数较多且模型复杂,需要进行参数的调试和检验。分布式水文模型的使用需要大量观测数据并深入了解水文变化的物理过程,现有使用分布式水文模型的研究多是在模型中所需资料较为齐全的地区,但在资料缺乏地区还具有一定限制。

3.3 生态系统服务

土地利用/覆盖变化被认为是生态系统服务能力变化最主要的驱动力^[80]。生态系统服务价值为衡量生态系统服务能力的重要指标,对生态系统服务价值评估分为传统的对价值量和物质质量的评估方法以及建立生态系统服务价值评估模型的方法。

Costanza等^[81]率先对全球生物圈的生态系统服务价值进行评估,但此研究中对耕地和湿地的估值存在着偏差;谢高地等^[82-84]参考其部分研究成果制定了中国陆地生态系统服务价值当量表。长江流域的生态系统服务价值研究多是基于以上研究成果对价值量进行评估。各种土地利用类型中,单位生态服务价值由大到小依次为湿

地、水域、林地、草地、耕地和未利用地。长江流域建设用地扩张和耕地减少的情况会使该地区生态服务价值下降。传统的评估方法是通过建立土地利用转移矩阵选取适宜生态系统单位面积服务价值表,计算服务价值并进行敏感性分析。如程建等^[11]研究表明2000—2010年长江流域总服务价值逐年提高,尤其是调节服务,其次是支持和供给服务。鄱阳湖、巢湖和太湖为中心沿江湖泊和湿地生态服务价值最高,其次是四川及青海省林草地覆盖区域。分布在长江三角洲、长江中游城市群和四川盆地的耕地聚集区为长江流域重要的产粮功能区,青海省内的荒漠地区生态服务价值较低。刘桂林等^[85]研究表明,长江三角洲地区1980—2010年建设用地面积增加4.5倍,未利用地和水域略有增加,耕地、草地和园地略有减少,总生态服务价值略有减少;李辉等^[86]研究表明1986—2018年三峡库区耕地、林地和草地呈现减少趋势,水域、建设用地和未利用地呈现增加趋势,总生态系统服务价值减少。长江流域的生态系统服务功能变化情况由于研究的时空差异而不同,但总体上都是研究区域内的土地利用类型由单位生态价值高的类型向单位生态价值相对较低的类型转换,从而引起生态服务价值的下降,反之亦然。在评估方法上,传统的基于价值量和物质量的评估方法以静态评估为主,评价结果单一,忽略了空间异质性,无法对多种生态系统服务功能进行权衡研究。由于缺乏标准统一的生态系统服务评估指标体系,评估研究的交叉验证和对比十分困难。

现有许多团队构建了生态系统服务价值的量化模型来衡量土地利用/覆盖变化对生态系统功能的影响,如生态系统服务和权衡的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)、生态系统服务社会价值模型等生态系统服务人工智能等。其中InVEST应用最为广泛和成熟,已成为全球生态系统服务评估的主要模型。但InVEST模型中各模块都需要一定的空间数据,使用门槛高。为减少模块运行的输入信息,人们采取了一些假设和简化算法,这影响了评估结果的精度,很多模型对生态系统服务价值的评估集中在水源供给、碳存储和土壤保持和生物多样性等方面,针对其他服务的研究(如娱乐文化和原材料等)相对匮乏。Li等^[87]模拟4种未来情景下土地利用/覆盖数据评估长江中下游地区的生态环境变化。研究结果

表明长江下游生态比中游恶化程度高,区域发展应加大环境保护力度;刘园等^[88]基于InVEST模型研究了长江中游经济带的生境质量,结果表明高生境质量地区大多存在于山地丘陵和水域;刘春艳等^[89]使用InVEST模型对三峡库区重庆段土地覆盖与生物多样性之间关系进行模拟;孙传璋等^[90]分别设置生态保育、经济增长和自然增长情景模拟预测鄱阳湖生物多样性变化。但InVEST模型在应用中存在问题,由于模型研发具有一定的地域背景,应用于长江流域的研究需要考虑模型参数的适宜性,模型算法中对一些过程的简化也会带来结果的不确定性。中国在评估模型研发方面仍然处于初级阶段,缺少自主研发的适用于中国的生态模型,尤其是针对地理位置和自然环境特殊的长江流域的生态系统服务模型。

4 讨论与展望

4.1 土地利用数据产品的差异性

虽然目前公开的土地利用数据众多,但分类体系、时空尺度各有差异,难以符合各研究需要,而且数据集精度难以得到保证,尤其是对难以分类的土地利用类型(如园地、湿地和不同种类的林地等)和地形复杂的山区,现有对不同土地利用数据的精度评价研究表明不同数据集一致性差^[91-93]。因此,众多学者倾向于根据研究需要制定分类体系,选择合适的遥感影像进行解译,自主生产土地利用数据并进行研究分析,研究的时间尺度、基础土地利用数据的差异导致了研究结果的差异,难以进行横向对比以及对研究方法的评估。土地利用数据集生成方式较为单一但工作量大,如果可以生产出具有普适性的分类体系和时空分辨率的高精度长江流域土地利用/覆盖数据集,极有可能会推进长江流域的土地利用/覆盖相关研究的发展。

4.2 土地利用/覆盖变化驱动因素的区域性

长江上游地区,尤其是长江源地区是青藏高原最为脆弱和敏感地区,土地利用/覆盖变化受到自然和人类活动的双重影响,但更侧重于自然环境的驱动,驱动机制相对复杂而且缓慢。长江中下游地区,人类活动的影响大于气候变化,城市化发展较快,驱动效应明显,需要平衡城市发展与生态保护之间的关系以缓解洪涝灾害、热岛效应等问题。现有研究对自然因素驱动长江流域土地利用变化明显存在欠缺,需要加强各驱动

因素对土地利用/覆盖变化的复合作用机理的模拟与分析,并考虑在众多驱动因子耦合的情况下,如何利用分析驱动机理等手段,确定不同驱动因素在不同区域对土地利用/覆盖变化的影响程度,从而正确理解自然因素和社会经济因素与土地利用/覆盖变化之间的关系,为有针对性地进行科学防治提供依据。

4.3 生态环境响应过程的复杂性

在土地利用变化对气候变化影响方面,众多学者从土地利用/覆盖变化对气候的生物物理机制影响出发,研究气候与土地利用/覆盖变化的定量关系。如地表反照率、植被覆盖度、叶面积指数、土壤发射率和粗糙度长度等对气候的影响,上述地表参数的改变均对气候产生一定的影响,但区域的气候变化是众多下垫面参数改变的情况下共同作用的结果,过程复杂且造成的影响可能由于区域差异而不同。除此之外,土地利用/覆盖变化也会通过生物地球化学循环排放或吸收温室气体来影响碳氮循环,导致气候变化。目前针对上述两个过程的影响评估和分析也存在着困难,未来围绕气候变化的土地利用/覆盖变化研究需要将两种过程产生的作用分离,考虑众多耦合过程和不同时空范围、尺度和气候背景下气候对土地利用/覆盖的响应情况。

4.4 水文过程

在土地利用变化与水文过程相互作用方面,目前研究重点已经由揭示特定时空下的水文效应转变为结合水文模型和土地利用变化模型,预测未来土地利用情况对水文过程的影响。另外,由于土地利用/覆盖变化改变流域下垫面条件,水文序列的一致性遭到破坏,开展变化环境下的水文动态模拟也是未来水文科学发展的重要方向。今后的研究中,有必要侧重于研究在空间格局上土地利用/覆盖变化对水文过程的影响机制,同时在全球极端天气频发的背景下,需要加强土地利用/覆盖变化对极端水文事件的影响方面的研究。大量研究结果表明,气候变化在水循环中仍占据主导作用,土地利用/覆被变化与气候变化也有一定关联,如何合理解释土地利用/覆被变化-气候变化-水循环-土地利用/覆被变化的响应机理有待进一步分析。

4.5 生态服务价值评估的综合性

由于人们对生态系统服务的认知尚不全面,生态系统服务的空间异质性以及负面效应往往被忽略,评估的准确性受到限制。遥感和地理信

息系统在价值评估中的应用越来越多,但影响生态系统服务的因素众多,现有估值严重依赖于植被、湿地等特定土地利用分类,应提高其他多元地理空间数据在估值中的应用。多种生态类型的复合生态系统服务价值评估不足,目前研究还主要针对单一功能或单一生态系统,缺乏采取多种方法对复合生态系统的多种功能进行估值的研究。中国在评估模型研发方面仍然处于初级阶段,缺少自主研发的适用于中国的生态模型,尤其是针对地理位置和自然环境特殊的长江流域的生态系统服务模型。

对多种生态服务进行综合评估,研究不同服务之间的耦合关系,或与其他模型方法相结合,进行基于情景模拟的预测,可以为可持续发展目标制定提供依据。此外,生态系统供需空间格局和盈余区域变化也是近些年的研究热点。影响生态系统服务的因素众多,需要将众多因素综合考虑,量化气候变化和土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响,为长江流域的环境规划和生态保护工程实施提供科学依据。

5 结 语

本文梳理了长江流域土地利用/覆盖变化相关研究,包括变化的驱动因素及其生态效应等相关内容,总结了长江流域的相关研究方法及结果,讨论了现有研究存在的问题以及未来的发展方向。由于区域、时间和方法的差异,众多研究都存在难以进行横向对比和评估的问题,为了探究最适宜的方法以及得到可靠的结果,需要在相同研究尺度和研究方法上开展大规模的典型试验。另外基础数据的差异也是影响研究结果的重要因素,建立一个基于长江流域的具有普适分类体系和时空分辨率的高精度土地利用/覆盖数据集有利于推进长江流域的土地利用/覆盖相关研究的发展。目前有许多新的研究方法已在不同的研究区域或领域被证实可行,如基于数据驱动的深度学习方法及模拟物理机制的物理模型等方法,但在长江流域土地利用变化研究方面应用较少,应该加强对新的研究方法的对比评估及应用以及多方法耦合研究。此外,现有研究中侧重于土地利用/覆盖变化与驱动因素相关性分析较多,但对驱动因素引起变化的物理化学机制方面研究较少,迫切需要理清多过程耦合的驱动响应机制,为设计合适的研究方法以及采取有针对性的土地利用政策提供依据。

参 考 文 献

- [1] Meyer W B, Turner B L II. Human Population Growth and Global Land-Use/Cover Change [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992, 23: 39-61.
- [2] Lambin E F, Turner B L, Geist H J, et al. The Causes of Land-Use and Land-Cover Change: Moving Beyond the Myths [J]. *Global Environmental Change*, 2001, 11(4): 261-269.
- [3] Kong Lingqiao, Zhang Lu, Zheng Hua, et al. Driving Forces Behind Ecosystem Spatial Changes in the Yangtze River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 741-749. (孔令桥, 张路, 郑华, 等. 长江流域生态系统格局演变及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 741-749.)
- [4] Du Yun. Protecting the Eco-environment, and Striving for the Green Development in the Yangtze River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(2): 171-179. (杜耘. 保护长江生态环境, 统筹流域绿色发展[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 171-179.)
- [5] Ge Quansheng, Zhao Mingcha, Zheng Jingyun. Land Use Change of China During the 20th Century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6): 698-706. (葛全胜, 赵名茶, 郑景云. 20世纪中国土地利用变化研究[J]. 地理学报, 2000, 55(6): 698-706.)
- [6] Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang, et al. A Study on the Spatiotemporal Dynamic Changes of Land-Use and Driving Forces Analyses of China in the 1990s [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 35-37. (刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 35-37.)
- [7] Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. Spatial Patterns and Driving Forces of Land Use Change in China in the Early 21st Century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1411-1420. (刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1411-1420.)
- [8] Li Fenling, Chang Qingrui, Liu Jiaqi, et al. SVM Classification with Multi-texture Data of ZY-1 02C HR Image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 455-461. (李粉玲, 常庆瑞, 刘佳岐, 等. 基于多纹理和支持向量机的ZY-1 02C星HR数据分类[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(4): 455-461.)
- [9] Zhang Qian, Huang Xin, Zhang Liangpei. Multi-scale Image Segmentation and Classification with Supervised ECHO of High Spatial Resolution Remotely Sensed Imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(1): 117-121. (张倩, 黄昕, 张良培. 多尺度同质区域提取的高分辨率遥感影像分类研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(1): 117-121.)
- [10] Xu Su, Zhang Yongyong, Dou Ming, et al. Spatial Distribution of Land Use Change in the Yangtze River Basin and the Impact on Runoff [J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(4): 426-436. (徐苏, 张永勇, 窦明, 等. 长江流域土地利用时空变化特征及其径流效应[J]. 地理科学进展, 2017, 36(4): 426-436.)
- [11] Cheng Jian, Cheng Jiumiao, Wu Jiuxing, et al. Changes of Land Use and Ecosystem Service Functions in Yangtze River Basin from 2000 to 2010 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(6): 894-901. (程建, 程久苗, 吴九兴, 等. 2000—2010年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 894-901.)
- [12] He Liang, Li Weifeng, Tian Shufang, et al. Effects of Rapid Urbanization on Cultivated Land Protection in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7782-7789. (何亮, 李伟峰, 田淑芳, 等. 长江经济带快速城镇化对耕地保护的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7782-7789.)
- [13] Song Yanhua, Jiao Limin, Liu Jiafeng, et al. Analysis of the Factors Affecting the Degree of Urban Expansion: Taking Wuhan City as an Example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 417-426. (宋艳华, 焦利民, 刘稼丰, 等. 城市扩张程度的影响因素分析: 以武汉市为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 417-426.)
- [14] Yang Yang, Tang Xiaolan, Li Zhehui, et al. Spatiotemporal Evolution of Landscape Pattern of Land Use in the Yangtze River Basin and Analysis of Its Driving Factors—A Case Study from 2008 to 2018 [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(2): 220-230. (杨阳, 唐晓岚, 李哲惠, 等. 长江流域土地利用景观格局时空演变及驱动因子: 以2008—2018年为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 220-230.)
- [15] Hu Yueqin, Ma Yanfei, Zhang Weike. Land Use/Cover in China's Land Areas: Spatiotemporal Pattern Change and Driving Forces Analysis [J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(4): 26-35. (胡悦琴, 马燕

- 飞, 张伟科. 中国陆地区土地利用/覆被时空格局变化及驱动力分析[J]. 农学学报, 2020, 10(4): 26-35.)
- [16] Huang Baorong, Zhang Huizhi, Song Dunjiang, et al. Driving Forces of Built-up Land Expansion in China from 2000 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 4149-4158. (黄宝荣, 张慧智, 宋敦江, 等. 2000—2010年中国大陆地区建设用地扩张的驱动力分析[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4149-4158.)
- [17] Xie Gaodi, Cheng Shengkui, Ding Xianzhong. Study on Global Land Use Change Under the Stress of Population Growth[J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(3): 193-199. (谢高地, 成升魁, 丁贤忠. 人口增长胁迫下的全球土地利用变化研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 193-199.)
- [18] Wu Jian, Chen Li, Qiu Sijing, et al. Analysis of Land Use Dynamics and Driving Forces of Water Source Protection Areas in the Upper Reaches of the Huangpu River[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2021, DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641. (吴健, 陈力, 邱思静, 等. 黄浦江上游水源保护区土地利用动态及驱动力分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021, DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.)
- [19] Hu Xinli, Yi Yang, Kang Hongzhang, et al. Spatio-temporal Patterns and Driving Factors of Land Use Change in the Middle Reaches of the Yangtze River in Recent 25 Years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 39(6): 1877-1886. (胡昕利, 易扬, 康宏樟, 等. 近25年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1877-1886.)
- [20] Zhang Bo, Pu Lijie, Huang Xianjin, et al. Land Use Change and Driving Mechanism Research in City Region: The Yangtze River Delta as an Example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1): 28-33. (章波, 濮励杰, 黄贤金, 等. 城市区域土地利用变化及驱动机制研究: 以长江三角洲地区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 28-33.)
- [21] Kong Rui, Zhang Zengxin, Zhang Fengying, et al. Spatial and Temporal Dynamics of Forest Carbon Storage and Its Driving Factors in the Yangtze River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4): 60-66. (孔蕊, 张增信, 张凤英, 等. 长江流域森林碳储量的时空变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 60-66.)
- [22] Zhang Rongtian, Jiao Huafu. Urban Land Use Efficiency Pattern Evolution and Driving Mechanism in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(3): 387-394. (张荣天, 焦华富. 长江经济带城市土地利用效率格局演变及驱动机制研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 387-394.)
- [23] Ma Qifang, Deng Liangji, Huang Xianjin. Land Use Change and Its Driving Factors in the Mountainous Area of the Basin: A Case Study of Ya'an City, Sichuan Province[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2005, 41(3): 268-278 (马其芳, 邓良基, 黄贤金. 盆周山区土地利用变化及其驱动因素分析: 以四川省雅安市为例[J]. 南京大学学报(自然科学), 2005, 41(3): 268-278.)
- [24] Yao Yuanwen, Li Yangbing, Jin Zhaogui, et al. Analysis of Land Use Change and Driving Force in Guizhou [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(1): 67-74. (姚原温, 李阳兵, 金昭贵, 等. 贵州省大坝土地利用变化及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 67-74.)
- [25] Luo Ti, Liu Yaolin, Kong Xuesong. Spatial-temporal Characteristics and the Driving Mechanism of Urban-Rural Construction Land Changes in Wuhan—Based on the Perspective of Urban-Rural Integration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(4): 461-467. (罗媿, 刘耀林, 孔雪松. 武汉市城乡建设用地时空演变及驱动机制研究: 基于城乡统筹视角[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 461-467.)
- [26] Zhang Yajie, Jin Hai. Research on Efficiency of Urban Construction Land and the Drive Mechanism in the Mid-Yangtze River [J]. *Resources Science*, 2015, 37(7): 1384-1393. (张雅杰, 金海. 长江中游地区城市建设用地利用效率及驱动机理研究[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1384-1393.)
- [27] Zhang Xueru, Yao Yifeng, Kong Shaojun, et al. The Analysis on Urban Costruction Land Change and Driving Forces in Nanjing from 2000 to 2014 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(4): 552-562. (张雪茹, 姚亦锋, 孔少君, 等. 南京市2000—2014年城市建设用地变化及驱动因子研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 552-562.)
- [28] Zou Bin, Xu Shan, Zhang Jing. Spatial Variation Analysis of Urban Air Pollution Using GIS: A Land Use Perspective [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 216-222. (邹滨, 许珊, 张静. 土地利用视角空气污染空间分异的地理分析[J]. 武汉大学学报(信息科学

- 版), 2017, 42(2): 216-222.)
- [29] He Jianhua, Wang Xiaojun, Du Chao, et al. Simulation of Land Use Change and Analysis of Driving Forces in Wuhan Urban Agglomeration Based on a System Dynamic Model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(8): 1270-1278. (何建华, 王宵君, 杜超, 等. 武汉城市圈土地利用变化系统仿真模拟与驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1270-1278.)
- [30] Hu Bisong, Zhang Hanyue. Simulation of Land-Use Change in Poyang Lake Region Based on CA-Markov Model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(6): 1207-1219. (胡碧松, 张涵玥. 基于CA-Markov模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1207-1219.)
- [31] He Jianhua, Shi Xuan, Gong Jian, et al. Modeling the Spatial Expansion of Urban Agglomeration Considering Their Spatial Interaction: A Case Study of Wuhan Metropolitan Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 462-467. (何建华, 施璇, 龚健, 等. 顾及空间交互作用的城市群联动空间增长模拟——以武汉都市区为例. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(4): 462-467.)
- [32] Yu Yan, He Jianhua, Liu Yaolin. An Evaluation Framework of Farmland Preservation Policy Impacts: A Scenario Simulation Approach[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(2): 240-243. (俞艳, 何建华, 刘耀林. 耕地保护绩效评价的情景模拟方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(2): 240-243.)
- [33] Zhu Kangwen, Li Yuechen, Zhou Mengtian. Land Use Scenario Simulation of the Main City of Chongqing Based on the CLUE-S Model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(5): 789-797. (朱康文, 李月臣, 周梦甜. 基于CLUE-S模型的重庆市主城区土地利用情景模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 789-797.)
- [34] Liu Jiuyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal Characteristics, Patterns and Causes of Land Use Changes in China Since the Late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 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[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.)
- [35] Li Jiang. The Impact of Urban Expansion on Agricultural Land Use Intensity in China[J]. *Land Use Policy*, 2013, 35: 33-39.
- [36] Feng Mengzhe, He Jianhua, Tang Qinghui. Counterfactual Scenario Simulation and Evaluation of the Land-Use and Land-Cover Change of Jiayu County [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(9): 1122-1125. (冯梦喆, 何建华, 汤青慧. 土地利用变化反事实情景模拟与评价: 以湖北省嘉鱼县为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(9): 1122-1125.)
- [37] Han Yunhuan, Ma Zhuguo, Li Mingxing, et al. Numerical Simulation of the Impact of Land Use/Cover Change on Land Surface Process in China from 2001 to 2010[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021, 26(1): 75-90. (韩云环, 马柱国, 李明星, 等. 2001—2010年中国区域土地利用/覆盖变化对陆面过程影响的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(1): 75-90.)
- [38] Huang Qinghua, Zhou Zhibo, Liu Han. Studies of Industrial Structure Evolution and Policy Orientation of the Yangtze River Economic Zone[J]. *Economic Theory and Business Management*, 2014(6): 92-101. (黄庆华, 周志波, 刘晗. 长江经济带产业结构演变及政策取向[J]. 经济理论与经济管理, 2014(6): 92-101.)
- [39] Guo Qiang, Ye Xuchun, Liu Jia, et al. Impact of Land Use Change on Spatiotemporal Differentiation of Watershed Hydrological Processes: A Case Study of Ganjiang River Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(12): 2747-2759. (郭强, 叶许春, 刘佳, 等. 土地利用变化对流域水文过程时空分异的影响: 以赣江流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2747-2759.)
- [40] Yan Enping, Lin Hui, Wang Guangxing, et al. Analysis of Evolution and Driving Force of Ecosystem Service Values in the Three Gorges Reservoir Region During 1990—2011[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5962-5973. (严恩萍, 林辉, 王广兴, 等. 1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.)
- [41] Bian Xuefang, Wu Qun, Liu Weina. Relationship Between Urbanization and Urban Land Use Structure Change in China[J]. *Resources Science*, 2005, 27(3): 73-78. (边学芳, 吴群, 刘玮娜. 城市化与中国城市土地利用结构的相关分析[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 73-78.)
- [42] Liu Xinqiu, Wang Siming. Population Migration, Agricultural Development and Land Utilization Patterns in the Yangtze River Basin[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(12): 2084-2090. (刘馨秋, 王思

- 明. 长江流域的人口迁移、农业开发及土地利用方式[J]. 草业科学, 2013, 30(12): 2084-2090.)
- [43] Wang Xiulan. Analysis on Demographic Factors and Land Use/Land Cover Change[J]. *Resources Science*, 2000, 22(3): 39-42. (王秀兰. 土地利用/土地覆盖变化中的人口因素分析[J]. 资源科学, 2000, 22(3): 39-42.)
- [44] Shi Ruixiang, Kang Muyi. Analysis of Cultivated Land Change and Its Driving Forces in Farming-Pastoral Ecotone on NECT[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2000, 36(5): 700-705. (石瑞香, 康慕谊. NECT上农牧交错区耕地变化及其驱动力分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2000, 36(5): 700-705.)
- [45] Yang Chuanguo, Jin Yirong, Zhang Yuting, et al. Analysis on the Characteristics of Population Distribution in the Yangtze River Basin During the Sixth Census[C]//The 1st China Geodesy and Geophysics Academic Conference, Beijing, China, 2014. (杨传国, 金义蓉, 张玉婷, 等. 第六次人口普查长江流域人口分布特征分析[C]//第一届中国大地测量和地球物理学学术大会, 北京, 2014.)
- [46] Yan Dongsheng, Sun Wei, Wang Yue, et al. Change in Distribution and Growth Shifts of Population in the Yangtze River Delta and Influencing Factors[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(12): 2068-2082. (闫东升, 孙伟, 王玥, 等. 长江三角洲人口分布演变、偏移增长及影响因素[J]. 地理科学进展, 2020, 39(12): 2068-2082.)
- [47] Song Ke, Wang Yujun, Li Yin. Monitoring of Ecological Environment Changes in the Yangtze River Economic Belt(Jiangsu Province) from 1999 to 2020 and Analysis of the Driving Forces of Human Activities[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(2): 7-12. (宋珂, 王玉军, 李胤. 1999—2020年长江经济带(江苏段)生态环境变化监测及人类活动驱动分析[J]. 测绘通报, 2021(2): 7-12.)
- [48] Chen Qiong, Zhang Yili, Liu Fenggui, et al. A Review of Land Use Change and Its Influence in the Source Region of the Yellow River[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 446-459. (陈琼, 张懿铨, 刘峰贵, 等. 黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 446-459.)
- [49] Guo Xudong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. Effects of Land Use/Land Cover Changes on Regional Ecological Environment[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 1999(6): 66-75. (郭旭东, 陈利顶, 傅伯杰. 土地利用/土地覆盖变化对区域生态环境的影响[J]. 环境科学进展, 1999(6): 66-75.)
- [50] Cao Qian, Yu Deyong, Sun Yun, et al. Research Progress on the Quantitative Relationship Between Land-Use/Land-Cover Change and Climate Change[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 880-890. (曹茜, 于德永, 孙云, 等. 土地利用/覆盖变化与气候变化定量关系研究进展[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 880-890.)
- [51] Cao Lijuan, Zhang Dongfeng, Zhang Yong, et al. Sensitivity Research of the Effects of Land Use Change on Climate and Runoff over the Yangtze River Basin[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(4): 726-736. (曹丽娟, 张冬峰, 张勇, 等. 土地利用变化对长江流域气候及水文过程影响的敏感性研究[J]. 大气科学, 2010, 34(4): 726-736.)
- [52] Fu Zongbin, Yuan Huilin. Simulations of Regional Climatic Effects of Vegetation Change in China[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 46(8): 691-695. (符宗斌, 袁慧玲. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验[J]. 科学通报, 2001, 46(8): 691-695.)
- [53] Yin Guoying, Zhang Hongyan, Zhang Liangpei. Remote Sensing Monitoring of Agricultural Drought and Vegetation Sensitivity Analysis in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River from 2001 to 2019[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(8): 1245-1256. (尹国应, 张洪艳, 张良培. 2001—2019年长江中下游农业干旱遥感监测及植被敏感性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1245-1256.)
- [54] Chen Haishan, Zhang Ye. Sensitivity Tests of Large-Scale Urbanization on East Asian Winter Monsoon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1221-1227. (陈海山, 张叶. 大规模城市化影响东亚冬季风的敏感性试验[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1221-1227.)
- [55] Yin Menghan, Ai Dong, Ye Jing. Climate Change and Land Use Response of Metropolis of the Yangtze River Economic Belt: A Case Study of Wuhan[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 126-140. (尹梦晗, 艾东, 叶菁. 长江经济带中部大都市气候变化与土地利用响应: 以武汉市为例[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 126-140.)
- [56] Shi Zitong, Jia Gensuo, Hu Yonghong. Satellite Remote Sensing-Based Urban Land-Use Expansion and Its Influence on Surface Air Temperature Records in the Yangtze River Delta, China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2018, 23(5): 607-

618. (时子童, 贾根锁, 胡永红. 基于卫星遥感揭示长三角台站周边城市土地利用扩张及其对气温记录的影响[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(5): 607-618.)
- [57] Li Baoni, Xiong Lihua. Effects of Land Use/Cover Change on Atmospheric Humidity in the Midstream Urban Agglomeration Along the Yangtze River[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2020(6): 578-588. (李保妮, 熊立华. 土地利用/覆被变化对长江中游城市群大气湿度的影响[J]. 水资源研究, 2020(6): 578-588.)
- [58] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [59] Zeng Xiaofan, Zhou Jianzhong, Zhai Jianqing, et al. Research on Climate Projection for the Period 2011-2050 in the Yangtze River Basin[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(2): 116-122. (曾小凡, 周建中, 翟建青, 等. 2011—2050年长江流域气候变化预估问题的探讨[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 116-122.)
- [60] Hao Zhenchun, Ju Qin, Yu Zhongbo, et al. Evaluation of the Simulation Performance and Scenario Analysis for Temperature and Precipitation by Ipc AR4 Global Climate Models on Yangtze River Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 127-137. (郝振纯, 鞠琴, 余钟波, 等. IPCC AR4气候模式对长江流域气温和降水的模拟性能评估及未来情景预估[J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 127-137.)
- [61] Tao Hui, Huang Jinlong, Zhai Jianqing, et al. Simulation and Projection of Climate Changes Under the RCP4.5 Scenario in the Yangtze River Basin Based on CCLM[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2013, 9(4): 246-251. (陶辉, 黄金龙, 翟建青, 等. 长江流域气候变化高分辨率模拟与RCP4.5情景下的预估[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(4): 246-251.)
- [62] Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, et al. Numerical Simulation of the Impact of Contemporary Land Use on Regional Climate in China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2007, 37(3): 397-404. (高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟[J]. 中国科学:地球科学, 2007, 37(3): 397-404.)
- [63] Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. On the Role of Resolution and Topography in the Simulation of East Asia Precipitation[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 86(1): 173-185.
- [64] Chen Haishan, Li Xing, Hua Wenjian. Numerical Simulation of the Impact of Land Use/Land Cover Change over China on Regional Climates During the Last 20 Years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(2): 357-369. (陈海山, 李兴, 华文剑. 近20年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 357-369.)
- [65] Song Jinyihui, Cui Liangwei, Xiao Wen. Review on Land Use and Land Cover Changes[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(19): 11862-11863. (宋金易慧, 崔亮伟, 肖文. 土地利用和土地覆盖变化研究综述[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11862-11863.)
- [66] Shi Xiaoliang, Li Ying, Yan Denghua, et al. Advances in the Impacts of Watershed Land Use/Cover Change on Hydrological Processes[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(4): 301-308. (史晓亮, 李颖, 严登华, 等. 流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 301-308.)
- [67] Deng Huiping. Impacts of Climate Change and Land Use-Land Cover Change on Hydrology and Water Resources[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3): 436-441. (邓慧平. 气候与土地利用变化对水文水资源的影响研究[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 436-441.)
- [68] Bewket W, Sterk G. Dynamics in Land Cover and Its Effect on Stream Flow in the Chemoga Watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 445-458.
- [69] Shi Peili, Li Wenhua. Influence of Forest Cover Change on Hydrological Process and Watershed Run-off[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 481-487. (石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 481-487.)
- [70] Li Changfeng, Gao Junfeng, Cao Hui. Current Situation and Tendency of Research on Impacts of Land Use Changes on Water Resource[J]. *Soils*, 2002, 34(4): 191-196. (李昌峰, 高俊峰, 曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势[J]. 土壤, 2002, 34(4): 191-196.)
- [71] Cheng Hui, Wu Shengjun, Wang Xiaoxiao, et al. Research Progress on the Effects of the Three Gorges Reservoir on the Ecological Environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 127-140. (程辉, 吴胜军, 王小晓, 等. 三峡库区生态环境效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 127-140.)
- [72] Wu Dong, Huang Zhilin, Xiao Wenfa, et al. Land

- Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8): 2940-2946. (吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2940-2946.)
- [73] Lü Wen, Yang Guishan, Wan Rongrong. Impact of Land Use Changes on Spatialtemporal Pattern of Ecological Water Consumption in Taihu Lake Basin in Resent 25 Years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(3): 445-452. (吕文, 杨桂山, 万荣荣. 太湖流域近25年土地利用变化对生态耗水时空格局的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 445-452.)
- [74] Cao W Z, Bowden W B, Davie T, et al. Modelling Impacts of Land Cover Change on Critical Water Resources in the Motueka River Catchment, New Zealand [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(1): 137-151.
- [75] Beven K J, Kirkby M J. A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology / Un Modèle à Base Physique de Zone D'appel Variable de L'hydrologie Du Bassin Versant [J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [76] Im S, Kim H, Kim C, et al. Assessing the Impacts of Land Use Changes on Watershed Hydrology Using MIKE SHE [J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(1): 231-239.
- [77] Githui F, Mutua F, Bauwens W. Estimating the Impacts of Land-Cover Change on Runoff Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Case Study of Nzoia Catchment, Kenya / Estimation des Impacts Du Changement D'occupation Du Sol Sur L'écoulement à L'aide de SWAT: Étude Du Cas Du Bassin de Nzoia, Kenya [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2009, 54(5): 899-908.
- [78] Sun Zhandong, Huang Qun. Land Use-Cover Change and Its Large Scale Hydrological Effects in Yangtze River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(11): 2703-2710. (孙占东, 黄群. 长江流域土地利用/覆被变化的大尺度水文效应[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2703-2710.)
- [79] Cao Juanjuan, Zhou Yong, Wu Yijin, et al. Effect of Land-Use Changes of the Jiangnan Plain on the Regional Runoff [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(5): 610-617. (曹隽隽, 周勇, 吴宜进, 等. 江汉平原土地利用演变对区域径流量影响[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 610-617.)
- [80] Lambin E F, Baulies X, Bockstael N, et al. Land-Use and Land-Cover Change (LUCC): Implementation Strategy. IGBPReport 48/IHDP Report 10 [R]. Stockholm, Sweden: International Geosphere-Biosphere Programme, 1999.
- [81] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [82] Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological Assets Valuation of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196. (谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.)
- [83] Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert Knowledge Based Valuation Method of Ecosystem Services in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919. (谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.)
- [84] Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the Evaluation Method for Ecosystem Service Value Based on Per Unit Area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254. (谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.)
- [85] Liu Guilin, Zhang Luo Cheng, Zhang Qian. Spatial and Temporal Dynamics of Land Use and Its Influence on Ecosystem Service Value in Yangtze River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3311-3319. (刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3311-3319.)
- [86] Li Hui, Zhang Xiaoyuan, Guo Honglei. Spatial and Temporal Changes of Ecosystem Service Value in the Three Gorges Reservoir Area in the Past 30 Years Based on Land Use [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 309-318. (李辉, 张晓媛, 国洪磊. 基于土地利用的三峡库区近30年生态系统服务价值时空变化特征 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 309-318.)
- [87] Li Q, Yong Z, Cunningham M A, et al. Spatiotemporal Changes in Wildlife Habitat Quality in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River from 1980 to 2100 Based on the InVEST Model [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(1): 43-55.

- [88] Liu Yuan, Zhou Yong, Du Yuetian. Study on the Spatiotemporal Patterns of Habitat Quality and Its Terrain Gradient Effects of the Middle of the Yangtze River Economic Belt Based on InVEST Model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10): 2429-2440. (刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2429-2440.)
- [89] Liu Chunyan, Zhu Kangwen, Liu Jiping. Evolution and Prediction of Land Cover and Biodiversity Function in Chongqing Section of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19): 258-267. (刘春艳, 朱康文, 刘吉平. 三峡库区重庆段土地覆盖和生物多样性功能演化及预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 258-267.)
- [90] Sun Chuanzhun, Zhen Lin, Wang Chao, et al. Biodiversity Simulation of Poyang Lake Wetlands by Invest Model Under Different Scenarios[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7):1119-1125. (孙传淳, 甄霖, 王超, 等. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖湿地生物多样性情景分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1119-1125.)
- [91] Yang Yongke, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, et al. Comparison and Assessment of Large-Scale Land Cover Datasets in China and Adjacent Regions [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(2): 453-475. (杨永可, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 大尺度土地覆盖数据集在中国及周边区域的精度评价[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 453-475.)
- [92] Lu Miao, Wu Wenbin, Zhang Li, et al. A Comparative Analysis of Five Global Cropland Datasets in China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2016, 46(11): 1459-1471. (陆苗, 吴文斌, 张莉, 等. 不同耕地数据集在中国区域的对比研究[J]. 中国科学(地球科学), 2016, 46(11): 1459-1471.)
- [93] Fang Xiuqi, Zhao Wanyi, Zhang Chengpeng, et al. Evaluation Method and Case of Data Reliability of Global Historical LUCC Data Set [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2020, 50(7): 1009-1020. (方修琦, 赵琬一, 张成鹏, 等. 全球历史 LUCC 数据集数据可靠性的评估方法及评估案例[J]. 中国科学(地球科学), 2020, 50(7): 1009-1020.)