

# 全球土地覆被时空变化与中国贡献

李广东<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟院重点实验室,  
北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 20世纪下半叶以来全球土地覆被发生了剧烈变化,人类活动对土地覆被变化的影响成为“人类世”最为显著的特征之一。科学评估全球土地覆被变化的时空过程和新态势,分析中国在其中扮演的角色和地位并提出优化路径,成为中国在可持续发展领域应对全球百年未有之大变局的核心任务之一。本文基于多源土地覆盖数据,运用地理空间分析方法定量刻画了全球土地覆被变化的时空演化过程,从景观尺度分析了地类间的转化关系以及全球“变绿”和森林覆盖度的变化趋势,揭示了中国对全球土地覆被时空变化的贡献。结果表明,1992—2015年全球土地覆被经历了显著变化,全球土地覆被变化度在南美洲中部、撒哈拉以南的非洲、中亚、东南亚和东亚等地形成显著的热点区。中国森林覆盖率从1990年的12.98%增至2020年的23.34%,湿地面积增长1908 km<sup>2</sup>,为维护全球生态安全贡献了力量,同时在城市用地增长、草地和其他用地减少等方面也有一定的限制作用。与全球其他国家不同,中国城市扩张占用耕地面积居全球第一位,高达7.3万 km<sup>2</sup>。1999—2019年全球叶面积指数存在全球性的显著提高趋势。中国以仅占全球6.6%的植被面积,贡献了全球20%左右的叶面积增加量,引领了全球“变绿”过程。1990—2020年全球森林覆盖度变化呈现出空间集聚性。中国森林面积增长62.84万 km<sup>2</sup>居全球前列,其中西南林区和秦巴山区是林地增长的主要区域,长三角、粤港澳大湾区和内蒙古东部部分地区是森林覆盖度降低的主要区域。中国未来应进一步提升经济社会发展与生态保护的均衡协调度,持续推进美丽中国建设,为全球生态安全和可持续发展贡献更大力量和更多经验。

**关键词:** 土地覆被变化;叶面积指数;森林;全球;中国

DOI: 10.11821/dlxb202202006

## 1 引言

20世纪下半叶以来,随着全球环境的急剧变化,农地扩张、森林砍伐以及快速工业化和城市化等典型人类活动导致全球土地利用/覆被变化进入了有史以来最为剧烈的“人类世”阶段<sup>[1-2]</sup>,并呈现出新的发展态势。1978年改革开放以来,快速的人口激增、经济增长<sup>[3]</sup>、城市化和全球化进程<sup>[4]</sup>导致中国成为全球土地利用/覆被变化最为急剧的国家之一<sup>[4-5]</sup>。仅1978—2017年中国城乡不透水地表面积就从15364 km<sup>2</sup>增至209950 km<sup>2</sup>,累计增长12.6倍<sup>[6]</sup>,面临着大量的耕地以及其他自然栖息地的丧失。但与此同时,得益于植树造林、天然林保护、退耕还林还草等生态修复和绿化工程等,中国也成为全球“变绿”

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971207); 第二次青藏高原科学考察研究(2019QZKK1005) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41971207; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No.2019QZKK1005]

作者简介: 李广东(1986-), 男, 山东临沂人, 副研究员, 中国地理学会会员(S110008922M), 主要从事城市地理、城镇化与生态环境关系研究。E-mail: ligd@igsrr.ac.cn

的核心主导之一<sup>[7]</sup>,为全球生态环境改善和可持续发展贡献了中国力量。

得益于遥感和GIS技术的快速发展,大量研究基于不同数据源和不同时空分辨率,分别探讨了全球和中国土地利用/覆被时空变化过程、驱动机制、生态环境效应等<sup>[8-9]</sup>,为理解全球和中国土地利用/覆被变化奠定了基础。但是,目前很少有研究将中国土地利用/覆被变化与全球土地利用/覆被变化相连接,探讨中国在全球土地利用/覆被变化中的角色及其贡献,理解二者的一致和差异之处,分析全球变化趋势对中国的启示。而这些信息对科学理解全球土地利用/覆被变化背景下中国土地利用/覆被变化的特征,客观认识中国对全球土地利用/覆被变化的贡献,提出土地利用和土地覆被剧烈变化的应对和缓解策略,推进中国的可持续发展具有至关重要的意义。

基于此,本文将以全球和中国土地利用/覆被变化为研究对象,基于多源土地利用/覆被数据,运用地理空间分析方法定量刻画全球土地利用/覆被变化的时空演化过程,重点从景观尺度分析耕地、林地、建设用地、草地、湿地和其他用地等地类的转化关系,以及全球“变绿”和森林覆盖度的变化趋势,揭示中国在全球土地利用/覆被变化中的角色和地位。深化全球视野下对中国土地利用/覆被变化的理解,总结其中的规律性,并发现关键问题,为土地覆被变化领域的相关决策提供参考。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 研究数据

**2.1.1 全球土地利用/覆被变化数据集** 全球土地利用/覆被变化综合制图是刻画全球土地利用/覆被变化最为常用的手段。通过对比各类全球土地覆被数据集后,本文选用欧空局研发的CCI-LC数据集,该数据集分辨率较高,且能实现20世纪90年代以来长时间序列年际土地覆被动态变化分析。该数据集的时间范围为1992—2015年,时间分辨率为1年,空间分辨率为300 m,制图精度为75%左右(据Land Cover CCI产品用户手册2.0版本)适合进行全球宏观尺度研究。数据地址为: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php>,产品用户手册详细介绍了数据生产过程和验证过程<sup>[10]</sup>。本文选用该数据集的Level1分类体系。同时,为容易与其他常用的土地覆被分类系统相对比,按照IPCC的分类系统将22种地类划分为耕地、林地、草地、湿地、城市用地和其他用地6类(IPCC与CCI-LC地类的详细对照关系参见Land Cover CCI Product User Guide V.2,其中其他用地包括水体、灌丛、稀疏植被、裸地和永久冰雪。同时,为进一步证实数据的精度,本文运用2011—2012年全球土地覆被众包参考数据集<sup>[11]</sup>对CCI-LC数据进行了验证。CCI-LC数据集的分类采用IPCC的6种土地覆被分类系统,并与众包参考数据集分类进行一一对应。运用全球15万个实地参考点,选取与参考数据时间接近的2005年、2010年和2015年CCI-LC数据进行了精度验证,通过验证数据平均用户精度为74.28%,与CCI-LC数据说明中的验证结果基本一致。其中,耕地的平均分类精度为80.36%,林地为75.96%、草地为71.23%、湿地为67.25%、城市用地为83.23%、其他用地为70.23%。从区域分布来看,不同地类在洲际之间存在一定差异,亚洲、欧洲、非洲、大洋洲、北美洲、南美洲的平均精度为73.48%,说明该数据集适合进行全球尺度的土地覆被变化分析。

**2.1.2 全球植被变化与森林覆盖度数据集** “植被绿化”是指在一个特定区域,统计上显著的年度或季节性的植物绿化增加现象<sup>[12]</sup>。目前,可以验证和表征全球植被变化状况的数据集包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)等<sup>[12]</sup>。

由于LAI指数具有更明确的物理意义, 因此得到更为广泛的应用。在Chen等<sup>[7]</sup>研究基础上, 本文运用精度更高的SPOT-VGT LAI数据集量化1999—2019年全球绿化过程中中国的贡献, 该数据集分辨率为1 km, 制图精度为85%左右<sup>[13]</sup>, V2版本数据的传感器为SPOT-VGT和PROBA-V, 原始数据时间分辨率为10 d, 通过月份平均和年度最大值合成年度数据。

目前全球对森林的界定有800多种, 数据来源多样<sup>[14]</sup>。本文运用Song等2018年发布的森林覆盖数据来刻画全球森林覆盖度的长时间变化趋势<sup>[15]</sup>。该数据集具有覆盖全球 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 分辨率。像元值(-100~100)代表1982—2016年间森林覆盖度的净变化百分比, 正值代表增加, 负值代表减少, 0代表不变。通过实地采样验证, 数据总体准确率大于90%。为了保持结果的一致性, 土地覆被数据分析中涉及林地的部分以此数据为准。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 空间变化分析方法** 空间变化分析的目标是识别出土地利用/覆被变化的核心区域, 并从景观尺度实现对全球土地利用/覆被数据的再分析, 从中总结空间变化规律。重点揭示中国土地利用/覆被变化在空间分布上与全球以及其他国家的异同点, 从而提出对中国土地利用/覆被变化的启示意义。景观尺度的土地利用/覆被变化程度量化选用Jensen-Shannon Divergence (JSD)<sup>[16]</sup>方法。该方法可以测算两个镶嵌体(土地覆被分类模式)的不同(同一个单元内 $t_1$ 时间的像元和 $t_2$ 时间的像元), 通过相对应的直方图统计量 $M_{t1}$ 和 $M_{t2}$ 来表征。JSD将两个直方图之间的信息距离表示为两个直方图 $(M_{t1}+M_{t2})/2$ 的共轭香农熵与单个直方图 $M_{t1}$ 和 $M_{t2}$ 的平均熵之间的偏差。JSD的值可以用 $d(M_{t1}, M_{t2})$ 来表示, 用下式表示<sup>[17]</sup>:

$$d(M_{t1}, M_{t2}) = H\left(\frac{M_{t1} + M_{t2}}{2}\right) - \frac{H(M_{t1}) + H(M_{t2})}{2} \quad (1)$$

式中:  $H(M)$ 表示直方图 $M$ 的香农熵。

$$H(M) = -\sum_{i=1}^{|N|} m_i \log_2 m_i \quad (2)$$

式中:  $m_i$ 为直方图 $M$ 中第 $i$ 个纵向条的值;  $|N|$ 为纵向条的数量(两个直方图相同)。对于归一化直方图, JSD差异性总是取0~1之间的值, 0表示两个镶嵌体的直方图相同, 1表示差异最大(在一个镶嵌体中找到的土地覆被类型在另一个镶嵌体中都找不到)。差异值是对变化幅度的定量评价, 差异越大, 变化越大。全球尺度JSD的计算参照Nowosad等<sup>[19]</sup>的方法来实现。

**2.2.2 时间趋势分析方法** Mann Kendall趋势检验(简称M-K检验)用于分析随时间变化的数据, 以确定数据的持续增加或减少趋势(单调)。M-K检验是一种非参数检验, 这意味着它适用于所有分布, 但需要保证数据没有序列相关性。零假设( $H_0$ )为没有单调趋势。3种可能的替代假说: ①有一个单调上升趋势; ②有一个单调下降趋势; ③有一个单调上升趋势或一个单调下降的趋势。它是一种广泛应用于金融、气候、水文和环境时间序列趋势检验的稳健方法。

本文运用可以实现栅格数据M-K检验分析的R语言程序包“Kendall”来实现M-K检验分析。首先, 构建1999—2019年全球LAI和1982—2016年全球森林覆盖度长时间序列数据集。其次, 运用R语言程序包“Kendall”进行全球LAI和森林覆盖度变化的M-K检验。最终, 输出 $\tau$  (Kendall  $\tau$ 统计量)、 $sl$  (双尾 $p$ 值)和 $S$  (Kendall得分)等参数, 将 $p \leq 0.05$ 视为统计显著, 其他为不显著, 将全球LAI和森林覆盖度变化趋势划分为显著降低、显著提高和不显著3类。

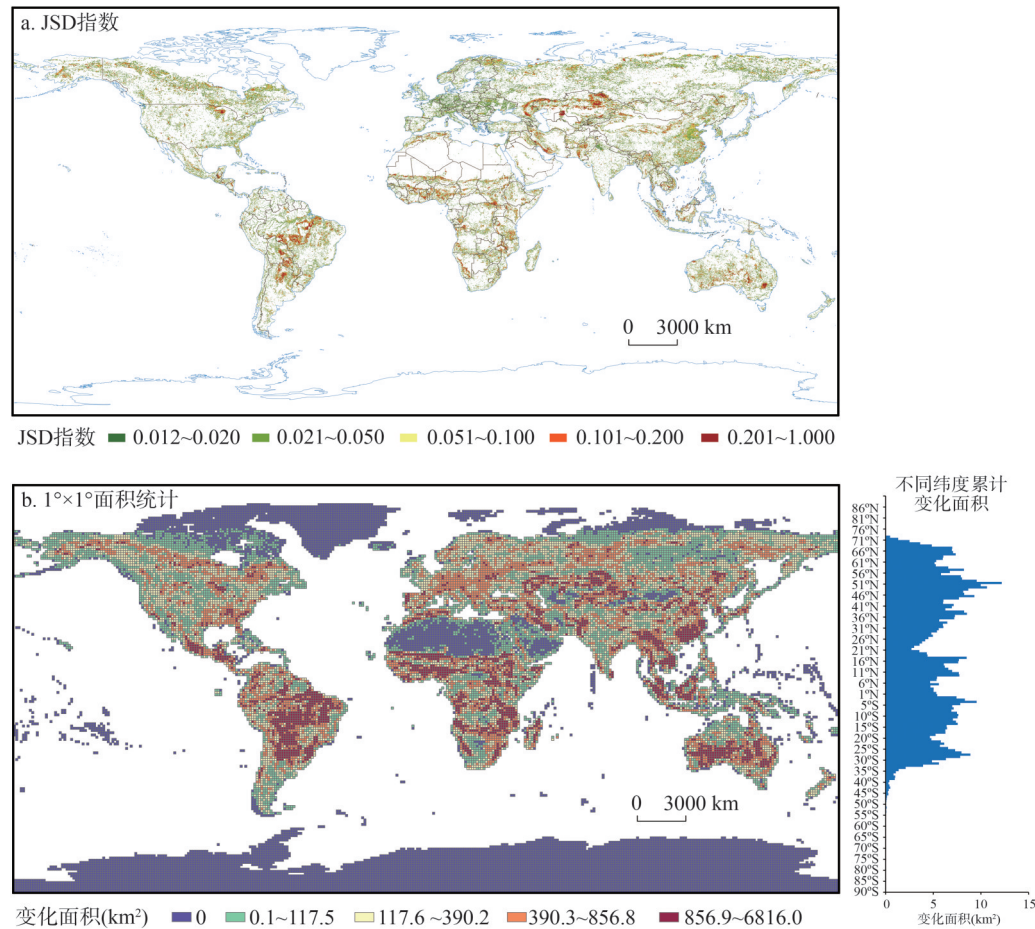


### 3 全球和中国土地覆被时空变化过程分析

#### 3.1 土地覆被空间演化过程

从空间演化来看, 1992—2015年全球土地覆被变化显著。根据自然断点法对全球土地覆被演化过程进行分类, 发现全球土地覆被变化度(JSD指数)存在几个显著的热点区(图1a, 按照自然断点法分级), 包括南美洲中部、撒哈拉以南的非洲、中亚、东南亚、东亚和澳大利亚等。以 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 面积统计图来看(图1b, 按照自然断点法分级), 北半球中纬度地区( $231.45$ 万 $\text{km}^2$ , 占全球变化总面积的 $34.20\%$ )和南半球中低纬度地区( $231.58$ 万 $\text{km}^2$ , 占全球变化总面积的 $34.22\%$ )是土地覆被变化的高值区。除了不适宜人类居住的南极洲、格陵兰岛、北极圈地区、撒哈拉沙漠、阿拉伯沙漠等区域外, 自然和人类活动引起的土地覆被变化几乎影响到全球全部的陆地表层。

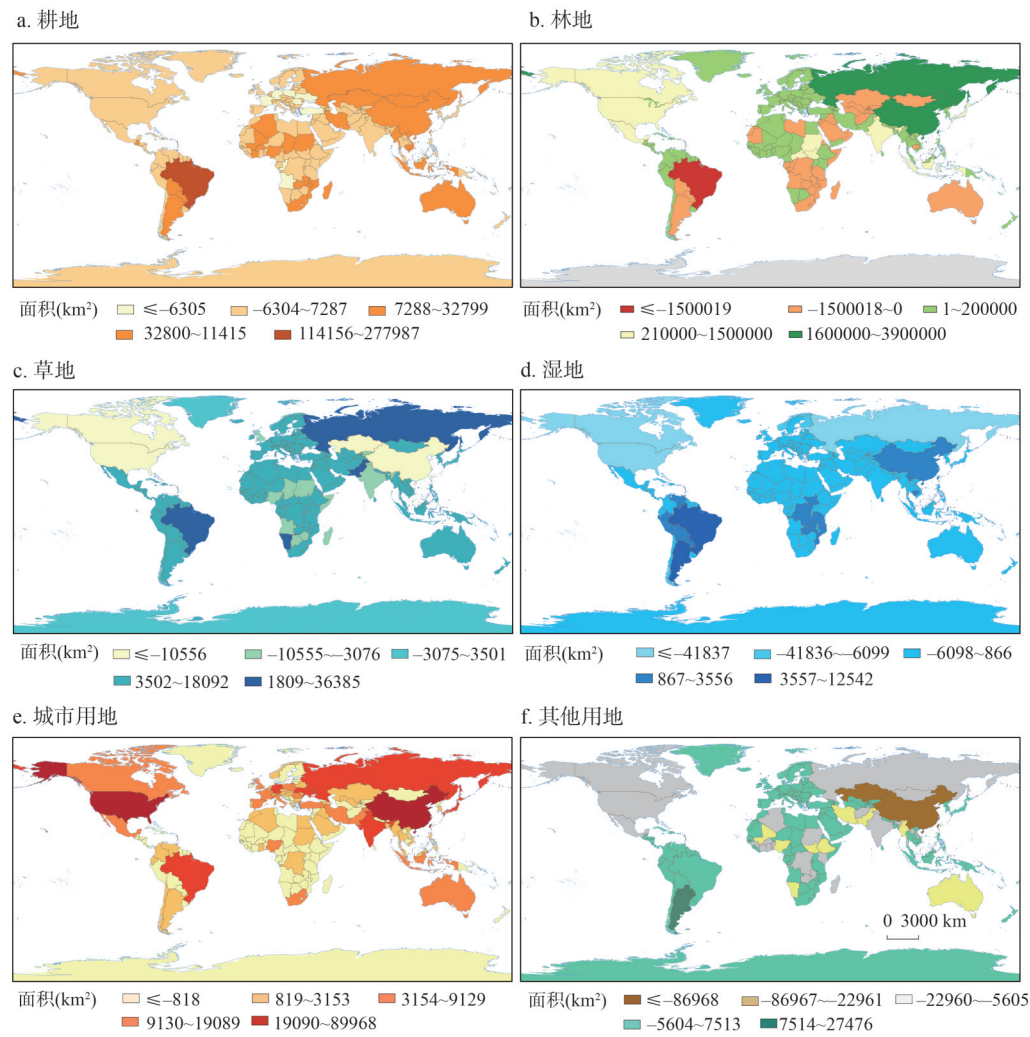
从国家尺度土地覆被变化统计来看(图2, 按自然断点法分级), 土地覆被类型在国家之间的变化趋势差异明显。草地、湿地的面积增加国与面积降低国在空间上均呈聚集分布。全球113个国家1992—2015年间实现耕地增长, 巴西增长最为迅猛, 面积高达



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1667号标准地图制作, 底图边界无修改。

图1 1992—2015年全球土地覆被变化JSD指数与 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 面积统计

Fig. 1 JSD index (a) and  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  area statistics (b) of global land cover changes from 1992 to 2015



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1667号标准地图制作，底图边界无修改。

图2 1992—2015年全球土地覆被变化面积国家尺度统计

Fig. 2 National scale statistical chart of global land cover change area from 1992 to 2015

277987 km<sup>2</sup>。中国得益于严格的耕地保护制度实现了耕地净增加，24年间耕地增加面积为21298 km<sup>2</sup>，位居全球第10位。

全球林地变化的空间分布较分散，有13个国家面临着林地的净减少，73个国家出现净增长<sup>①</sup>。其中，减少面积最大的国家为巴西，其林地减少面积为326132 km<sup>2</sup>；增长面积最大的国家为俄罗斯和中国。

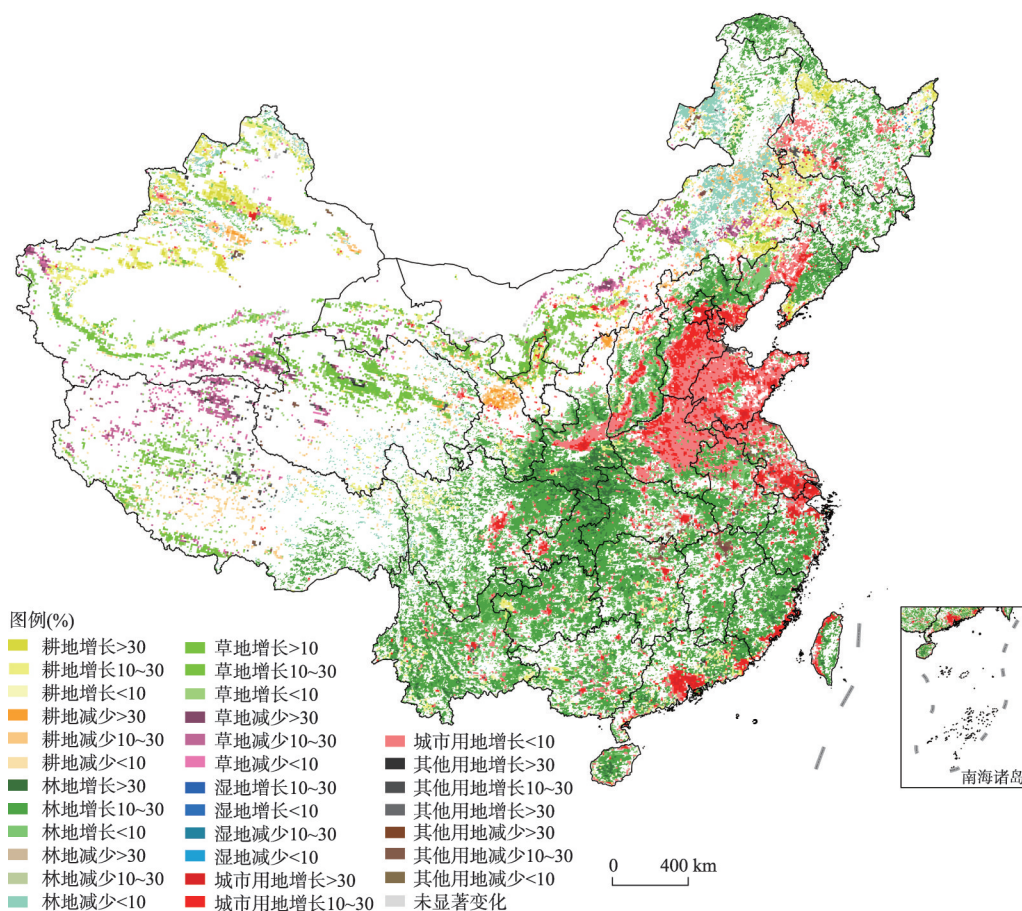
全球草地的变化呈现空间集聚性，有90个国家出现净减少趋势。北美洲整体以草地面积降低为主，南美洲西部、欧洲、东南亚均以草地增加为主。全球草地丧失最为严重的国家分别为哈萨克斯坦、美国、中国、加拿大。俄罗斯成为全球草地净增长面积最大的国家。

① CCI-LC全球林地覆被数据与中国森林资源调查的分类体系以及与其他森林覆盖度数据不同，鉴于森林定义的差异和森林变化对全球生态安全的重要作用，本文将对森林覆盖变化进行单独分析，基于土地覆被数据的森林变化仅做参考。

湿地作为全球生态服务价值最高的地类,其面积变化的空间分布特征与草地相似,聚集性更强,北美洲国家集中表现为下降趋势,非洲北部、欧洲、南亚、中亚及东南亚均集中表现为增长。统计显示,全球80个国家出现了面积净减少趋势。全球湿地面积降低最大的国家分别是俄罗斯、美国和加拿大。巴西湿地增长面积位居全球第一。中国湿地面积实现净增长,增长面积为1908 km<sup>2</sup>,位居全球第7位,为全球湿地保护贡献了力量。

全球城市用地增长呈现出明显的空间差异性,216个国家出现城市用地增长趋势。得益于改革开放和快速的经济增长、城镇化和城市建设,中国城市用地面积增长超过美国,居全球首位,高达89968 km<sup>2</sup>,1992—2015年间城市增长面积相当于约旦的国土面积。全球其他用地变化涉及的国家最为广泛,其中165个国家出现了显著的减少趋势。哈萨克斯坦和中国位居全球其他用地减少的前列,分别减少99590 km<sup>2</sup>和86968 km<sup>2</sup>。

CCI-LC全球林地覆被数据与中国的森林资源调查分类体系以及与其他森林覆盖度数据不同,鉴于森林定义的差异和森林变化对全球生态安全的重要作用,本文将对森林覆盖度变化进行单独分析。从空间分布演化看,全球和中国的土地覆被变化均表现出部分地类的集聚和分散趋势(图3)。其中,城市用地的空间演化格局较为明显。相比全球其他国家,中国的城市用地增长在空间分布上既出现在大城市群集聚也存在中西部分散分



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 1992—2015年中国土地覆被变化分布(9 km×9 km 格网)

Fig. 3 Spatial distribution of land cover change in China from 1992 to 2015 (9 km×9 km grid)



布的态势，这对中国的耕地保护、自然栖息地保护和生态安全造成了一定的影响。

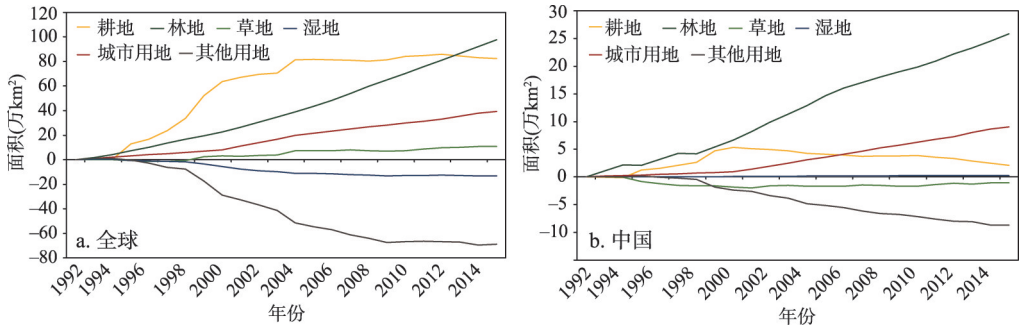
从国家尺度来看，中国的土地覆被变化对全球可持续发展具有重要贡献。① 中国实施最为严格的耕地保护制度在一定程度上促进了耕地的净增长，对保障全球粮食安全具有重要意义。② 中国湿地面积实现了净增长，与全球湿地大面积减少形成鲜明对比。湿地对维持全球淡水储量和水质有着重要贡献，更是应对气候变化、极端天气事件的重要突破口和重要工具，有助于推动各国及世界的可持续发展。③ 得益于退耕还草政策，中国内蒙古中部、甘肃北部、新疆、青海和西藏等地草地面积有所增长，这些地区生态系统较为脆弱，天然草地能够极大改善当地气候，起到重要的防风固沙作用，是重要生态屏障，能有力维系当地可持续发展。④ 中国其他用地面积急剧减少，证明中国荒漠化的治理成效显著，导致大量的荒漠出现绿化现象，碳汇逐步增加，为应对气候变化和实现联合国2030可持续发展目标做出了积极贡献。

3.2 土地覆被时间演化过程

从时间演化的视角看，全球和中国的土地覆被都经历了显著变化（表2），并表现出明显的阶段性特征（图4）。随着全球人口的不断激增，全球耕地面积在1992—2015年间累计增长面积最大，达到82.14万km<sup>2</sup>。耕地的增长可以划分为两个阶段：第一个阶段是1992—2003年，该阶段全球耕地增长迅速；第二个阶段是2004—2015年，这一阶段全球耕地的增长相对平缓，世界耕地面积在2000年后呈现区域差异性，大洋洲、非洲、南美洲等耕地面积增长，而亚洲、欧洲、北美洲由于城市扩张侵占耕地，导致耕地面积下降。但得益于巴西等主要国家耕地面积激增，一定程度上补偿了总面积的下降幅度，故2004—2015年全球耕地增长相对平缓。相比较而言，中国的耕地变化则经历了3个不同

表2 全球与中国土地覆被面积变化综合对比  
Tab. 2 Comprehensive comparison of global and China's land cover area changes

土地覆被面积及变化(万km <sup>2</sup> )		耕地	草地	湿地	城市用地	其他用地
全球	1992年	2508.79	1368.59	203.67	34.74	6118.10
	2015年	2590.93	1379.25	190.55	74.08	6049.39
	1992—2015年净变化量	82.14	10.66	-13.12	39.33	-68.70
中国	1992年	271.83	265.97	3.14	3.52	220.56
	2015年	273.96	264.88	3.33	12.52	211.86
	1992—2015年净变化量	2.13	-1.09	0.19	9.00	-8.70
中国变化量占全球比例(%)		2.59	-	-	22.87	12.66



注：林地变化数据来源于参考文献[15]。

图4 1992—2015年全球与中国土地覆被累计变化面积统计

Fig. 4 Cumulative land cover change area in the world and China from 1992 to 2015

的阶段, 1992—1994年耕地累计面积经历了小幅减少阶段; 1995—2000年之间则迅速增长, 累计面积一度达到5.34万 $\text{km}^2$ , 形成高速增长阶段; 但2000年之后增速逐步下滑, 耕地面积处于缓慢减少阶段。2000年后, 中国进入新一轮快速城镇化时期, 大规模城市建设占用了大量耕地资源, 是耕地面积降低的主要原因。中国的耕地总面积目前占全球的8%, 1992—2015年中国耕地实现净增加, 且增加面积位居全球第10位, 耕地增长对全球耕地保护与粮食安全贡献巨大。但从演化趋势看, 未来中国耕地增长的下滑趋势仍将进一步延续, 加之城镇化的快速发展和人口基数大等因素的影响, 国家粮食安全仍面临一定挑战, 耕地保护压力大于全球整体的耕地保护压力。

森林砍伐和林地丧失在过去几十年成为全球性生态环境问题。但是, 据Song等的研究<sup>[15]</sup>, 全球林地在1992—2015年间实现了净增长, 主要是因为热带地区的净损失被温带地区的净增长所抵消。林地面积在1992—1999年间处于缓慢增长阶段, 之后减少速度逐步放缓, 增长速度逐步提高, 到2008年增长面积达到最大值, 之后逐步稳定。中国森林面积从1990年157.14万 $\text{km}^2$ 增加至2020年的219.98万 $\text{km}^2$ , 森林覆盖率从12.98%增长至23.34%, 人工林面积目前居全球第一, 是全球森林覆盖率增长最大的国家, 这得益于中国近年来积极推动生态修复工程和森林可持续经营, 为实现全球可持续发展贡献了中国力量。

全球草地变化呈现出两个阶段: 1998年之前为第一阶段, 此阶段草地保持小幅减少的状态; 第二阶段为1999—2015年, 草地变化维持了略有上升的趋势。与全球演化趋势相反, 中国草地变化一直维持负增长的状态。

湿地作为“地球之肾”对维持全球生态安全至关重要。但几十年来, 全球湿地截至2015年累计净减少13.12万 $\text{km}^2$ , 相比1992年减少了6.44%, 减少比例远超其他地类, 值得引起全球关注。与全球湿地的大面积减少相反, 中国湿地面积实现了净增长<sup>[18]</sup>, 截至2015年净增加0.19万 $\text{km}^2$ , 为维持全球生态安全做出了积极贡献。

全球城市用地增长面积仅次于耕地, 呈现出两个增长阶段, 2000年之前增长较为缓慢, 2000年之后增长速度迅速提高。1992—2015年间全球城市用地实现了翻倍增长, 2015年相比1992年净增长1.13倍。而同期中国的城市用地增速更大, 24年间共净增长2.56倍, 增长面积占全球城市用地净增长量的22.87%, 是全球城市用地增长的主要贡献者。与全球增长阶段相类似, 中国的城市用地增长同样表现出两个阶段, 2000年后的增长速度更快。中国城市用地的快速增长需要客观认识。一方面, 中国的快速城镇化带来的城市用地快速增长为经济腾飞提供了条件, 推进了城市的快速发展, 满足了经济发展和人民生活对建设用地的紧迫需求。另一方面, 快速的城市用地扩张占用了大量高质量耕地和自然栖息地对粮食安全和生态安全构成了一定的威胁。

截至2015年, 其他用地成为全球用地面积减少最大的地类。全球与中国其他用地1992—2015年间一直保持净减少态势, 中国其他用地减少面积占全球的12.66%。其他用地主要包括灌丛、稀疏植被、裸地和永久冰雪, 该类用地多集中分布于青藏高原和西北干旱区等生态环境本身已极为脆弱的地区, 其快速减少对生态环境将具有两方面的可能影响。如果是植树造林等绿化活动导致的裸地等地类的面积减少可能对生态环境起到积极作用。如果是永久冰雪或者其他生态系统服务功能低的地类转化, 可能对生态环境构成威胁, 且青藏高原和西北干旱区具有显著的空间转移效应和放大效应, 生态环境的变化会影响第三极、亚洲乃至全球, 该地区生态环境威胁与全球生态环境变化密切相关, 未来加强其他用地的保护将是这些地区生态保护的要点之一。



### 3.3 土地覆被地类转化关系分析

从不同地类的转换关系看, 全球与中国表现出不同的特征(图5)。全球耕地变化量较大, 共301万 $\text{km}^2$ 。其中, 耕地转换为林地的面积最大, 共68.4万 $\text{km}^2$ (占转出总量的62.5%), 其次是城市用地(26.5万 $\text{km}^2$ )。而耕地增加最大的来源也是林地, 其次是其他用地和草地。耕地与林地之间的互动是全球最重要的地类变化关系。与全球变化不同, 中国最大的耕地转出行为是转为城市用地(7.3万 $\text{km}^2$ ), 林地(9.8万 $\text{km}^2$ )、草地(4.1万 $\text{km}^2$ )和其他用地(1.8万 $\text{km}^2$ )是转换为耕地的三大核心来源。

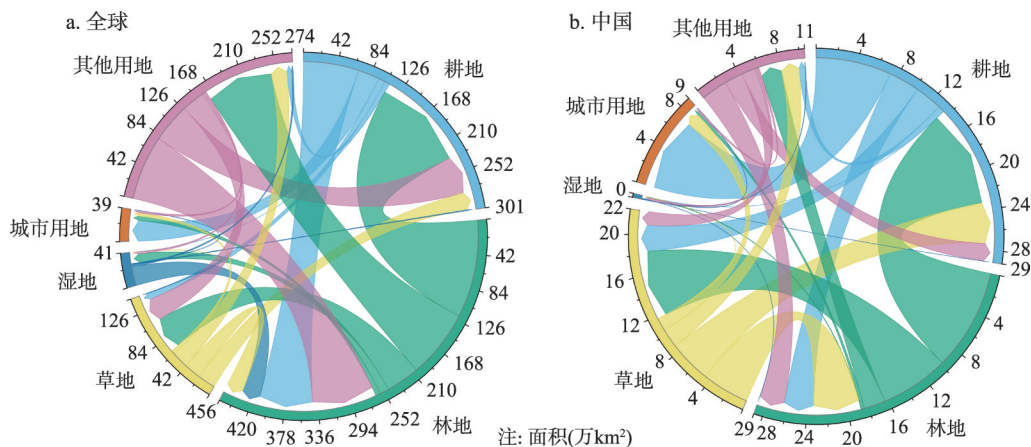


图5 1992—2015年全球和中国土地覆被地类转换弦图关系

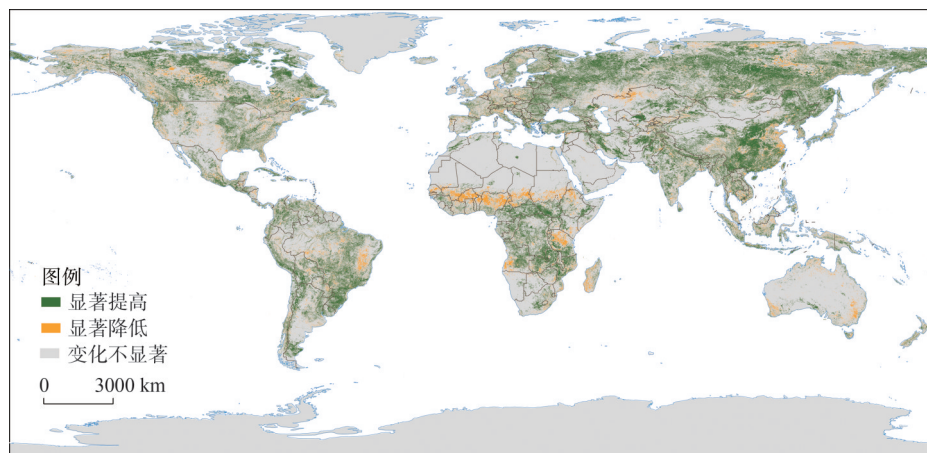
Fig. 5 Chord relationship between land cover type conversions for the world and China from 1992 to 2015

全球其他用地的变化面积位居第三(274万 $\text{km}^2$ )。其他用地主要转出为林地(79.5万 $\text{km}^2$ )、耕地(48.3万 $\text{km}^2$ )和草地(28.3万 $\text{km}^2$ )三大类, 同时也接收到林地(84.7万 $\text{km}^2$ )、草地(20.2万 $\text{km}^2$ )和耕地(6.5万 $\text{km}^2$ )的转入, 但面积显著小于转出。中国的其他用地转换过程与全球类似。全球草地的转入面积稍大于转出面积, 林地(41.3万 $\text{km}^2$ )和其他用地(28.3万 $\text{km}^2$ )是草地增加的主要来源, 而草地主要转出为耕地(22.1万 $\text{km}^2$ )、林地(21万 $\text{km}^2$ )和其他用地(20.2万 $\text{km}^2$ )。中国草地转出比例显著高于全球水平, 主要转出为林地(4.6万 $\text{km}^2$ )、耕地(4.1万 $\text{km}^2$ )、其他用地(1.8万 $\text{km}^2$ )和城市用地(1.3万 $\text{km}^2$ )。草地增加的主要来源是林地(6.7万 $\text{km}^2$ )、耕地(2.7万 $\text{km}^2$ )和其他用地(1.4万 $\text{km}^2$ )。全球湿地转出面积大于转入面积, 湿地主要转出为林地(23.3万 $\text{km}^2$ )。同时林地也是湿地转入的主要地类, 湿地与林地之间的互动关系是湿地变化的主因。中国湿地变化比例远小于全球水平, 其中突出的特点是其他用地转化为湿地, 成为湿地增加的主因。

全球城市用地虽然经历了显著变化, 但仍是全球变化面积最小的地类。耕地(26.5万 $\text{km}^2$ )、林地(5.8万 $\text{km}^2$ )、草地(4.1万 $\text{km}^2$ )和其他用地(2.8万 $\text{km}^2$ )是城市用地面积增加的主要来源, 其中耕地占据主导地位(67.3%)。中国的城市用地增长相比全球更为迅速, 从来源来看耕地的占比更高(7.3万 $\text{km}^2$ , 80.7%), 其次是草地(1.3万 $\text{km}^2$ ), 林地(0.3万 $\text{km}^2$ )和其他用地(0.2万 $\text{km}^2$ )的占用比例较低。城市扩张导致的大量耕地丧失尤其是优质耕地的丧失是中国20世纪90年代以来快速城镇化的相应代价, 是威胁部分地区生态安全的主因。未来一段时间中国的城镇化进程仍将持续推进。因此, 珍惜与合理利用土地和切实保护耕地仍是中国未来一段时间的基本国策。

### 3.4 全球“变绿”的时空过程与中国贡献

除了通过全球土地覆被变化数据表征外,植被“变绿”(叶面积指数增加称作变绿)现象也成为近20年来全球土地利用/覆被变化的重要趋势。通过1999—2019年全球叶面积指数的变化趋势分析(图6),1999年以来LAI存在全球性的显著提高趋势( $p \leq 0.05$ )。而全球显著“变黄”(叶面积指数减少称作变黄)的区域主要集中在部分区域,如非洲撒哈拉沙漠南缘地区、巴西东南部、哈萨克斯坦西北部等。统计表明全球1/3的植被LAI出现显著变化的趋势,其中82.90%的显著变化区出现“变绿”趋势,17.10%出现“变黄”趋势。

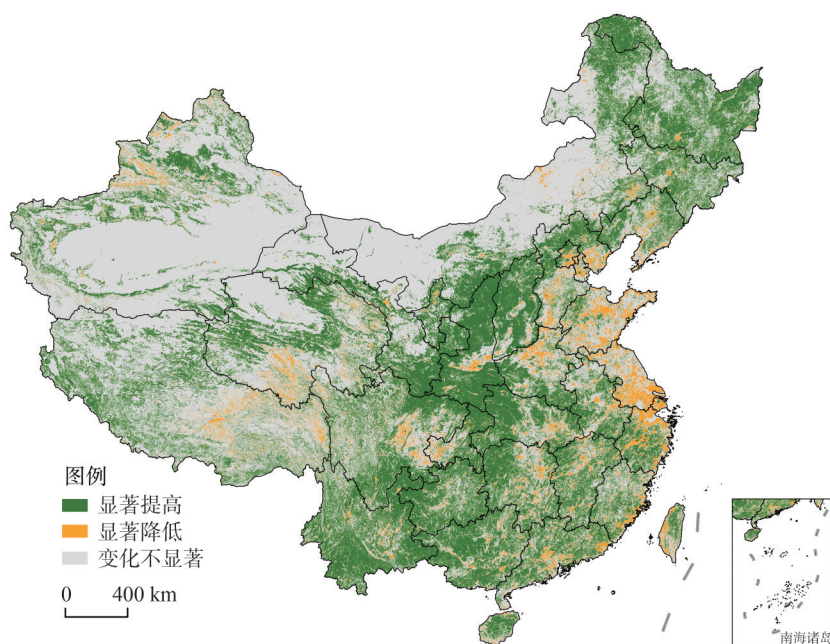


注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1667号标准地图制作,底图边界无修改。

图6 1999—2019年全球叶面积指数(LAI)变化Mann Kendall趋势

Fig. 6 Mann-Kendall trend of global LAI changes from 1999 to 2019

中国以仅占全球6.6%的植被面积<sup>[7]</sup>,却贡献了全球20%左右的叶面积增加量,对全球“变绿”起到了主导作用。统计表明,中国国土面积40%左右的植被LAI出现显著变化趋势,其中88%的显著变化区出现“变绿”趋势,12%出现“变黄”趋势。其中,中国“变绿”的过程中林地和农用地的贡献最大。这主要得益于中国几十年来实施了一系列的生态修复工程来保护和扩大森林面积,以及实施最为严格的耕地保护制度来遏制耕地的快速流失。从空间分布来看,中国的植被“变绿”区分布较为分散,其中密度较高的区域集中在黄土高原、西南地区 and 东北地区3个片区(图7),陕西、山西、贵州、云南、广西均有超过60%的国土面积出现“变绿”趋势。其中,最具典型意义的是黄土高原地区的生态修复和治理。黄土高原一度是中国水土流失最为严重的地区,但经过长期的治理,目前成为彰显中国生态保护成绩和体现中国对全球生态保护贡献的突出代表。经过几十年的水土流失治理和生态修复,近年来黄土高原林地面积和植被覆盖度均明显提高,陕西和山西分别有78%和68%的区域出现显著的“变绿”趋势,位居全国前两位。退耕还林(草)工程和持续多年的水土保持生态建设取得了显著成效。与“变绿”相对应,“变黄”地区也有一定的分布。其中,最为显著的地区是长三角城市群、粤港澳大湾区、京津冀城市群、山东半岛城市群、中原城市群和成渝城市群以及各地的省会都市圈等重点城镇化地区。其中,上海、江苏、山东“变黄”区域占各自国土面积的占比最高,分别为52%、36%和24%。但同时也应该注意到,西藏中东部、青海南部和新疆西部等局部地区出现的植被明显“变黄”趋势。这些地区生态本底薄弱,植被一旦破坏,恢复的难度相比其他地区难度会更大。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。

图7 1999—2019年中国叶面积指数(LAI)变化Mann Kendall趋势

Fig. 7 Mann-Kendall trend of LAI changes in China from 1999 to 2019

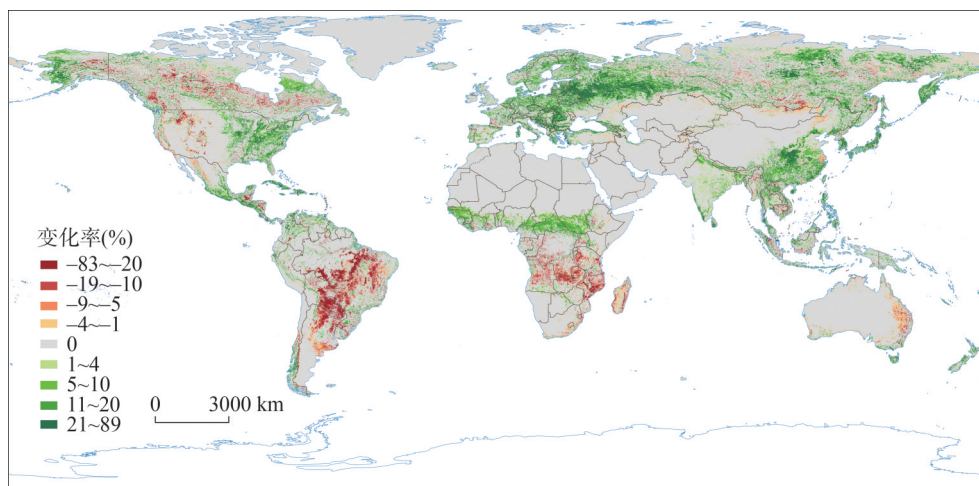
本文的研究结果与Chen等<sup>[7]</sup>的研究结果相比具有以下异同点:在数据上,本文运用精度更高和时间序列更长的SPOT-VGT LAI数据集量化1999—2019全球“变绿”过程中中国的贡献,该数据集分辨率为1 km。Chen等<sup>[7]</sup>运用的数据为MODIS LAI数据集,数据的原始分辨率为500 m,但是为便于与气候模型相匹配,他们最终将其聚合为0.05°分辨率。在方法上,同样运用了Mann Kendall趋势分析方法。本文的结论与Chen等<sup>[7]</sup>的研究结论存在一定的差异。Chen等<sup>[7]</sup>的研究发现全球1/3的植被“变绿”,但也有5%“变黄”。本文发现全球1/3的植被LAI出现显著变化的趋势,其中82.90%的显著变化区出现“变绿”趋势,17.10%出现“变黄”趋势。与Chen等的研究结论一致,本文也发现中国以仅占全球6.6%的植被面积,却贡献了全球20%左右的叶面积增加量,对全球“变绿”起到了主导作用。但是在空间分布上研究结论稍有差异,与“变绿”相对应,中国在高密度城镇化地区植被“变黄”地区也有一定的分布,而Chen等的研究发现“变黄”区域更小。

### 3.5 全球森林覆盖度变化的时空过程与中国贡献

由于森林具有极为重要的生态系统服务功能和维持全球生物多样性的重要性,森林变化一直是全球土地覆被变化最受关注的地类。全球森林覆盖度趋势分析显示(图8),1982—2016年全球森林覆盖度显著降低区面积为133万km<sup>2</sup>,提高区面积为304万km<sup>2</sup>,相比1982年森林覆盖度净增长了7.1%<sup>[15]</sup>。全球森林覆盖度的显著降低区和显著提高区呈现空间集聚现象。全球主要的森林覆盖度显著降低区集中分布在亚马孙平原、南美洲中部、非洲南部等地。此外,北美洲的北部地区、俄罗斯、东南亚以及澳大利亚东部地区也是森林覆盖度降低的热点地区。而森林覆盖度显著提高区则主要分布在中国中部和南部、俄罗斯、欧洲东部、非洲中部、美国东部等地。

按照联合国粮农组织(Global Forest Resources Assessment, FRA)的森林分类,中国森林面积逐步增长,从1990年的15714.059万hm<sup>2</sup>增加至2020年的21997.818万hm<sup>2</sup>。森



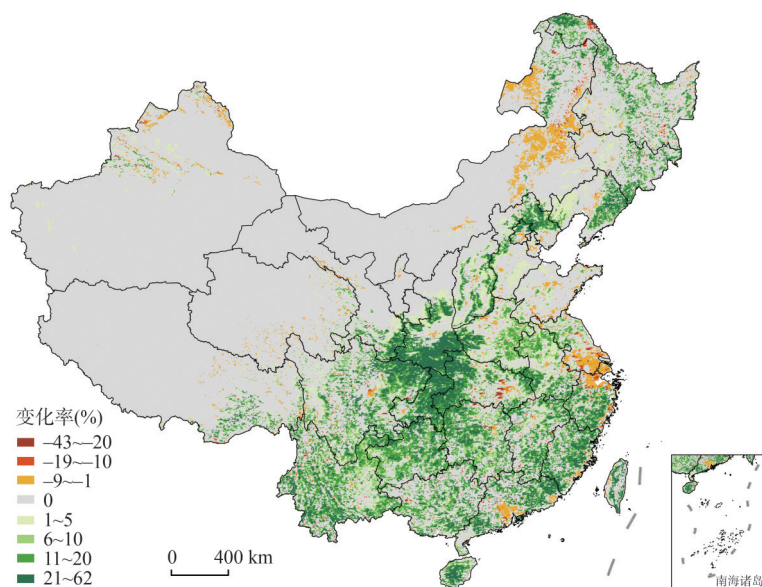


注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1667号标准地图制作,底图边界无修改。

图8 1982—2016年全球森林覆盖度变化趋势

Fig. 8 Change trend of global forest coverage from 1982 to 2016

林覆盖率从12.98%增长至23.34%，植树造林和森林生态系统修复取得了显著成效，为全球生态安全和可持续发展贡献了重要力量。从森林覆盖度变化趋势看（图9），显著增长区高于显著降低区。西南林区和秦巴山区是中国林地增长的主要区域，其中陕西南部、重庆大部、四川东部、湖北西部以及贵州、云南和广西的大部分地区均有显著增长区。此外，东南林区和东北地区部分地区也出现显著的增长趋势。但是，部分地区也出现了显著的森林覆盖度降低趋势。其中，长三角城市群、粤港澳大湾区和内蒙古东部部分地区是主要的森林覆盖度降低区。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。

图9 1982—2016年中国森林覆盖度变化趋势

Fig. 9 Change trend of forest coverage in China from 1982 to 2016

## 4 全球和中国土地覆被变化新态势对中国可持续发展的启示

从上述分析看,中国土地覆被变化与全球土地覆被变化的总体态势有相同点,但也存在诸多差异。把握全球和中国土地覆被变化的新态势将对中国可持续发展提供科学参考和政策启示。20世纪后半叶以来中国一直是全球土地覆被变化的热点区,短期来看随着社会经济的进一步发展,中国作为全球土地覆被变化的热点区仍将持续一段时间。但是,长期来看随着中国人口增速的减缓和经济增长进入新常态以及生态文明理念的逐步深入和美丽中国建设的逐步推进,中国土地覆被变化度将有所放缓,而维持生态系统稳定性的能力将进一步得到提升<sup>[19]</sup>。但是,不可否认协调社会经济发展尤其是城市发展与生态空间保护的关系仍将是实现可持续发展的核心任务和重点攻坚方向。

在具体地类变化上,与其他国家相比中国在生态系统保护上取得了一定成效,尤其是对具有重要生态系统服务功能的林地和湿地的修复和保护<sup>[20]</sup>。但是,中国草地面积的减少和退化仍然需要警惕。草原生态系统的维持是广大中西部地区尤其是牧区实现可持续发展的重点。进一步推进草原生态系统修复工程将关系到这些地区的长久发展。另一个突出问题是城市用地增长对耕地的占用面积大和占用比例过高。与其他国家城市建设用地占用林地、草地和其他用地不同,中国人口密集地区和城市用地增长的重点区也是耕地集中区。短期看城市建设用地扩张对耕地的占用无法避免。但粮食安全问题一直是中国可持续发展的一大挑战。近期受新型冠状病毒疫情影响国际粮食进出口市场存在不稳定性,中国更需要进一步增加耕地面积来保障国家粮食安全,防范国际粮食市场的不利冲击。因此,城市建设对耕地的大量占用现象应及时遏制,城市发展与耕地保护之间的矛盾仍需进一步权衡和协调。

土地覆被变化不仅与局地的生态环境和社会经济发展紧密相关,也与近程和远程的生态环境和社会经济发展存在关联<sup>[21]</sup>。全球土地覆被变化都处于复杂的全球人地关系关联网络中。本文虽然只分析了局地的土地覆被变化过程,但是在政策制定中仍需要充分考虑外部要素的影响,从更广泛的视角和尺度研判土地覆被变化的时空过程、驱动机制和影响效应。

## 5 结论与讨论

全球土地覆被的显著变化及其引致的生态系统和社会经济变化使其成为全球百年未有之大变局中的关键要素之一。本文以全球和中国土地利用/覆被变化为研究对象,基于多源土地覆被变化数据,运用地理空间分析方法定量刻画了全球土地利用/覆被变化的时空演化过程,从景观尺度分析了耕地、林地、建设用地、草地、湿地和其他用地等地类的转化关系,以及全球“变绿”和森林覆盖度的变化趋势,揭示了中国在全球土地利用/覆被变化中的角色和地位,并提出了相应的政策启示。

研究发现,由于对土地覆被不同地类的定义不同、运用的数据源不同、制图方法不同,本文也将相关结论与已有文献进行了比较分析和互检。例如,关于中国耕地面积的变化,研究发现2000年之后增长面积逐步下滑,形成缓慢下滑阶段,但是1992—2015年耕地面积总体是净增加的。该结论与现有文献所述的中国耕地面积变化趋势基本一致,但是在具体变化数量上存在一定的差异<sup>[20, 22]</sup>。主要是因为各数据集对耕地的定义存在差异。综合各套数据集对耕地定义来看,本文使用的数据集对于耕地的定义更加广泛,所包含的面积更广,包含更多破碎性耕地,因此会得出不同结论。同时,全球数据集对林

地的定义也存在较大的差异。目前存在较多的定义标准,也是导致森林数据无法准确对比的一大原因。因此,未来建议进一步规范土地覆被的分类标准,实行全球统一的地类定义,增强数据的可比性。通过验证欧空局CCI-LC数据集的平均用户精度为74.28%,因此该数据集在部分区域可能会导致土地覆被变化分析存在较大的不确定性。由于相隔时间较长,1992年CCI-LC土地覆被数据的精度无法运用2011—2012年全球土地覆被众包参考数据集加以验证,因此地类转化关系分析部分的数据精度可能存在一定的不确定性。尽管这种不确定性可能会影响土地转化关系分析,但是已有研究表明CCI-LC数据集的空间分辨率和时间一致性可以满足全球尺度的地类转化关系分析<sup>[23]</sup>。与其他基于遥感反演的数据集一样,CCI-LC数据集也存在一些限制。例如,其运用了不同来源的输入数据,特别是1992—1999年的AVHRR数据以及1999年和2003年以后的SPOT-VGT数据和MERIS数据。AVHRR数据较粗的空间分辨率被重采样到300 m以生成最终的土地覆被产品,但数据的原始1 km分辨率可能会对早期的土地覆被数据有一定影响。此外,目前的精度验证一般基于短期的数据,未来需要进一步收集多年份的参考数据评估CCI-LC数据集的准确度。同时,未来应该进一步运用多源遥感数据结合机器学习和深度学习等算法进行深入的数据融合分析。结合实地验证提高全球尺度长时间序列土地覆被数据的精度仍是全球土地利用变化研究的重要任务之一。

本文的主要结论如下:

(1) 1992—2015年全球土地覆被经历了显著变化,全球土地覆被变化度在空间上形成几个显著的热点区,包括南美洲中部、撒哈拉以南的非洲、中亚、东南亚、东亚和澳大利亚等。全球耕地、草地和城市用地呈增长趋势,而湿地和其他用地呈减少趋势,并分别表现出明显的阶段性特征。中国耕地和湿地经历了净增长,城市用地面积迅速扩张,草地和其他用地显著减少。中国土地覆被变化对全球土地覆被变化具有重要影响。

(2) 全球土地覆被地类之间的转化存在交互行为。耕地与林地之间的互动是全球最重要的地类变化关系。由于退耕还林还草政策的实施,中国林地增加的主要来源是草地、耕地和其他用地。中国最大的耕地转出行为是转为城市用地。

(3) 1999年以来全球1/3的植被叶面积指数出现显著变化趋势,其中82.90%的显著变化区出现“变绿”趋势,17.10%出现“变黄”趋势。而全球显著“变黄”的区域主要集中在非洲撒哈拉沙漠南缘地区、巴西东南部、哈萨克斯坦西北部等地。中国以仅占全球6.6%的植被面积,贡献了全球20%左右的叶面积增加量,对全球“变绿”起到了主导作用。中国植被“变绿”区主要集中在黄土高原、西南地区和东北地区3个片区,“变黄”区分布在重点城镇化地区。

(4) 1982—2016年全球森林覆盖度显著降低区面积为133万km<sup>2</sup>,提高区面积为304万km<sup>2</sup>,相比1982年森林覆盖度净增长了7.1%。全球森林覆盖度的显著降低区和显著提高区呈现空间集聚现象。森林覆盖度显著降低区集中分布在亚马孙平原、南美洲中部、非洲南部等地。中国为全球森林保护贡献良多。中国林地增长的主要区域为西南林区和秦巴山区,但高密度城镇化地区森林覆盖度显著降低。

## 参考文献(References)

- [1] Tucker M A, Böhning-Gaese K, Fagan W F, et al. Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science*, 2018, 359(6374): 466-469.
- [2] Lewis S L, Maslin M A. Defining the anthropocene. *Nature*, 2015, 519(7542): 171-180.
- [3] He C F, Huang Z J, Wang R. Land use change and economic growth in urban China: A structural equation analysis. *Urban Studies*, 2014, 51(13): 2880-2898.



- [4] Lambin E F, Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *PNAS*, 2011, 108(9): 3465-3472.
- [5] Lai L, Huang X J, Yang H, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601063. DOI: 10.1126/sciadv.1601063.
- [6] Gong P, Li X C, Zhang W. 40-year (1978-2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing. *Science Bulletin*, 2019, 64(11): 756-763.
- [7] Chen C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [8] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(4): 373-384.
- [9] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [10] ESA. CCI- LC Product User Guide version 2. [http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI- LC- Ph2-PUGv2\\_2.0.pdf](http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI- LC- Ph2-PUGv2_2.0.pdf). 2017.
- [11] Fritz S, See L D, Perger C, et al. A global dataset of crowdsourced land cover and land use reference data. *Scientific Data*, 2017, 4: 170075. DOI: 10.1038/sdata.2017.75.
- [12] Piao S L, Wang X H, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [13] Fuster B, Sánchez-Zapero J, Camacho F, et al. Quality assessment of PROBA-V LAI, fAPAR and fCOVER collection 300 m products of Copernicus Global Land Service. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 1017. DOI: 10.3390/rs12061017.
- [14] Sexton J O, Noojipady P, Song X P, et al. Conservation policy and the measurement of forests. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 192-196.
- [15] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, et al. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018, 560: 639-643.
- [16] Lin J. Divergence measures based on the Shannon entropy. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1991, 37(1): 145-151.
- [17] Nowosad J, Stepinski T F, Netzel P. Global assessment and mapping of changes in mesoscale landscapes: 1992-2015. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 78: 332-340.
- [18] Xu W H, Fan X Y, Ma J G, et al. Hidden loss of wetlands in China. *Current Biology*, 2019, 29(18): 3065-3071.
- [19] Zheng H, Wang L, Peng W, et al. Realizing the values of natural capital for inclusive, sustainable development: Informing China's new ecological development strategy. *PNAS*, 2019, 116(17): 8623-8628.
- [20] Liu Jiyan, Ning Jia, Kuang Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 789-802. [刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.]
- [21] Ma Enpu, Cai Jianming, Lin Jing, et al. Explanation of land use/cover change from the perspective of tele-coupling. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 421-431. [马恩朴, 蔡建明, 林静, 等. 远程耦合视角下的土地利用/覆被变化解释. *地理学报*, 2019, 74(3): 421-431.]
- [22] Liu Jiyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *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. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [23] Radwan T M, Blackburn G A, Whyatt J D, et al. Global land cover trajectories and transitions. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 12814. DOI: 10.1038/s41598-021-92256-2.

## Spatio-temporal change of global land cover and China's contribution

LI Guangdong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In recent decades, the global land cover has undergone drastic changes, and the impact of human activities on land cover change has become one of the most significant features of the "Anthropocene". The core tasks of coping with global "unprecedented changes in a hundred years" for China in the field of sustainable development is to scientifically assess the spatio-temporal process and new trends of global land cover change, analyze China's role and status in it, and propose optimal paths. We used geospatial analysis method and multi-source land cover data to explore the spatio-temporal process of global land cover change, analyze the transformation relationship between land types and the change trend of global "greening" and forest cover, and reveal the new characteristics and trends of land cover change in China. The results showed that the global land cover experienced significant changes from 1992 to 2015, and several hot spots formed, including central South America, sub-Saharan Africa, Central Asia, Southeast Asia and East Asia. China's forest coverage rate increased from 12.98% in 1990 to 23.34% in 2020, and the wetland area increased by 1908 km<sup>2</sup>, which contributed to the maintenance of global ecological security. The interactive conversion between cultivated land and forest is the most important land cover conversion relationship in the world. In terms of cultivated land occupied by urban land, China ranks first in the world, with an area of 73000 km<sup>2</sup>. The global leaf area index presented a global trend of significant increase from 1999 to 2019. With only 6.6% of the world's vegetation area, China contributed about 20% of the global increase in leaf area index and dominated the global "greening" process. The change of global forest coverage presents remarkably spatial agglomeration. China's forest area increased by 62.8376 million hectares (1990-2020), leading the world in forest restoration. The southwest China forest region and the Qinling-Daba mountains are the main areas of forest growth, and the Yangtze River Delta, the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and parts of eastern Inner Mongolia are the main areas of deforestation. In the future, China should further enhance the balance and coordination between socioeconomic development and ecological protection, continue to promote the building of a beautiful China, and contribute more strengths and experiences to global ecological security and sustainable development.

**Keywords:** land cover change; leaf area index; forest; global; China