



土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响

白 娥^{1,2,3*} 薛 冰³

¹长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 东北师范大学, 长春 130024; ²东北师范大学地理科学学院, 长春 130024; ³中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

摘 要 随着人口的增长和人类社会的发展, 土地利用与土地覆盖变化已经是不可避免。土地利用与土地覆盖变化不仅对生态系统的要素、结构和功能产生深远的影响, 也会对全球变化产生反馈作用。针对土地利用与土地覆盖变化的过程、驱动机制以及各个方面可能产生的生态环境效应的科学研究已经全面开展。该文综述了土地利用与土地覆盖变化对气候、土壤、生物地球化学循环、生物多样性以及区域生态环境等影响方面的研究进展, 并提出了相关研究的前沿方向展望。随着新技术的不断发展, 学者们将更多地侧重预测未来全球变化背景下的土地利用与土地覆盖变化趋势、合理性以及适应性, 为可持续发展提供基础资料和理论依据。

关键词 土地利用变化; 土地覆盖变化; 生物地球物理; 生物地球化学; 生态环境效应; 气候变化

白娥, 薛冰 (2020). 土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响. 植物生态学报, 44, 543–552. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0071

A review of influences of land use and land cover change on ecosystems

Edith BAI^{1,2,3*} and XUE Bing³

¹Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security in Changbai Mountains, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; ²School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; and ³Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract

With the growth of human population and the development of human society, land use and land cover change (LUCC) is inevitable. LUCC not only has a far-reaching impact on the elements, structure and functions of ecosystems, but also has a feedback effect on global climate change. Scientific research has been carried out on the processes of land use change, the driving mechanisms, and the possible ecological and environmental effects in various aspects. This paper reviews the research progress on the impacts of land use change on climate, soil, biogeochemical cycle, biodiversity and regional ecological environment, and puts forward the prospects for the frontier research. With the continuous development of new technologies, scholars will focus more on the prediction of the future development, rationality and adaptability of LUCC in the context of future global change, providing basic information and theoretical basis for sustainable development.

Key words land use change; land cover change; biogeophysics; biogeochemistry; eco-environmental effects; climate change

Bai E, Xue B (2020). A review of influences of land use and land cover change on ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 543–552. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0071

土地利用和土地覆盖变化(LUCC)包括两个部分, 其中土地利用是指人类根据一定的经济与社会目的, 对土地进行长期经营性活动, 如农业用地、工业用地、交通用地、居住用地等, 而土地覆盖则是指自然形成的或者人工建筑物所覆盖的地表诸要素的综合体, 如植被、土壤、冰川、湖泊、湿地、建筑物、道路等。一般情况下, LUCC是指因人类改变

土地利用和管理方式而导致土地覆被的变化, 因此是指土地利用与土地覆盖同时变化, 如森林转化为农田。但也存在土地利用变化但土地覆盖不变的情况, 如不改变草地覆盖但其利用由放牧变为休闲旅游; 相应地, 也存在土地利用不变但土地覆盖变化的情况, 如放牧草地利用方式不变的情况下, 因为过度放牧导致土地退化从而改变土地覆盖。本文所

收稿日期Received: 2020-03-17 接受日期Accepted: 2020-03-25

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFA060061)。Supported by the National Key R&D Program of China (2019YFA060061)。

* E-mail: baie612@nenu.edu.cn

论述的LUCC, 主要包括自然生态系统与农业用地间转化、森林的砍伐与重建、放牧引起的草地退化与重建、湿地的排水破坏与重建以及城市化、荒漠化等广义的土地利用和土地覆盖变化。

1 相关文献计量分析

LUCC会影响人类生存与发展的自然基础要素, 比如大气、区域气候、土壤、植被、水资源与生物等, 进而影响生物地球化学循环、能量交换、水分循环、土壤侵蚀和堆积等陆地主要生态过程。LUCC可能改变陆地生态系统的生物多样性、植物和动物的种群动态、初级生产力等, 对局地、区域及全球气候等产生广泛而深远的影响, 与全球的气候变

化、生物多样性的减少、生态环境演变以及人类与环境之间相互作用的可持续性等相关(Hurt et al., 2011; Lambin & Meyfroidt, 2011; Seto et al., 2012)。以“land use and land cover change”为关键词在Web of Science进行文献搜索, 发现2000年以前的文献较少, 2000年以后呈逐年增长趋势, 并在生态学、环境科学、生物多样性、农学、地理学、地质学、林学、气象学、地球物理科学、草学等研究方向均有相关论文(图1)。我国关于LUCC的研究起步较晚, 2010年后论文数量显著增加, 但占全球论文总量的比例仍较少(图1)。2000年以来的高被引论文的研究主题主要集中在全球LUCC的高分辨率数据库以及LUCC对气候、碳循环以及生物多样性等影响方面(表1)。

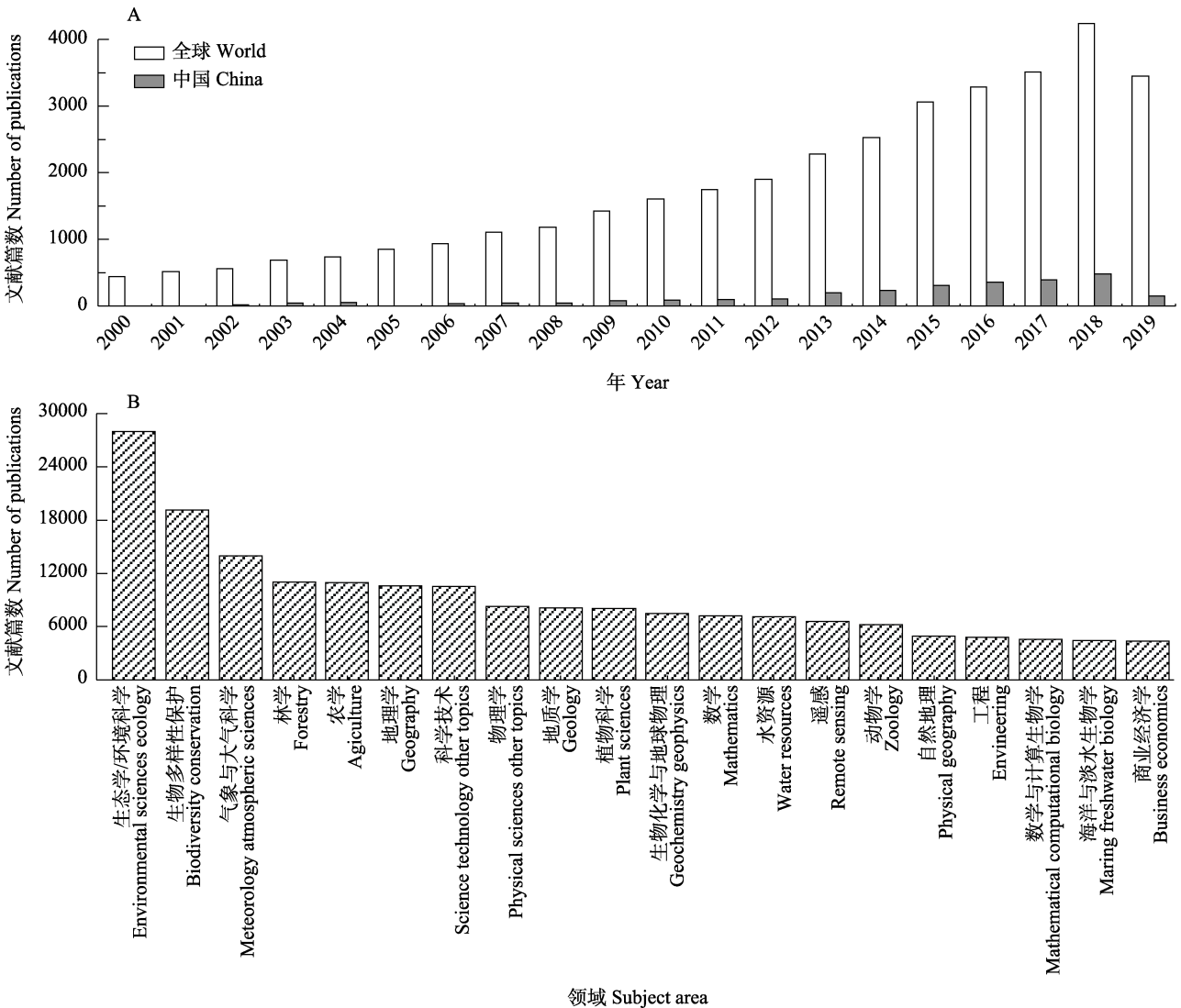


图1 2000–2019年发表的全球和中国的土地利用和土地覆盖变化相关文献数量变化(A)及其主要分布领域(B)。以“land use and land cover change”为关键词在Web of Science搜索而得, 截止时间为2019年11月。
Fig. 1 The number of papers published from 2000 to 2019 in China and world (A) and the main subject areas of these publications (B). Based on searching on Web of Science using keyword “land use and land cover change”.

表1 2000年以来土地利用和土地覆盖变化相关研究10篇重要的高被引论文
Table 1 Ten highly cited publications in the field of land use and land cover change since 2000

序号 No.	文献信息 Literature information	备注 Note
1	Goldewijk KK (2001). Estimating global land use change over the past 300 years: the HYDE database. <i>Global Biogeochemical Cycles</i> , 15, 417–433.	最常用的全球尺度土地利用和土地覆被变化(LUCC)数据之一 One of the most commonly used global scale land use and land cover change (LUCC) data
2	Ellis EC, Goldewijk KK, Siebert S, Lightman, D, Ramankutty N (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. <i>Global Ecology and Biogeography</i> , 19, 589–606.	综合各数据源, 研究了1700年到2010年间全球生态系统变化 The global ecosystem changes from 1700 to 2010 were studied by integrating various data sources
3	Lambin EF, Meyfroidt P (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. <i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i> , 108, 3465–3472.	综合分析全球LUCC及人地矛盾, 提出最大限度保留自然生态系统的相关策略 A comprehensive analysis of the global LUCC and the contradiction between human and land, suggesting the relevant strategies of retaining the natural ecosystems to the maximum extent
4	Seto KC, Guneralp B, Hutyra LR (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. <i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i> , 109, 16083–16088.	对至2030年的城市化进程进行预测, 并分析其对生物多样性和碳循环的影响 Forecasting the urbanization process to 2030 and analyzing its impact on biodiversity and carbon cycle
5	Hurttt GC, Chini LP, Frolking S, Betts RA, Feddema J, Fischer G, Fisk JP, Hibbard K, Houghton RA, Janetos A, Jones CD, Kindermann G, Kinoshita T, Goldewijk KK, Riahi K, Shevliakova E, Smith S, Stehfest E, Thomson A, Thornton P, van Vuuren DP, Wang YP (2011). Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. <i>Climatic Change</i> , 109, 117–161.	将土地利用历史数据与基于多个综合评价模型情景信息结合, 研究人类1500–2100年地球系统的影响的LUCC情景 LUCC scenarios of the impact of human on earth system between 1500–2100 via combination of historical land use data with scenario information based on multiple comprehensive evaluation models
6	Houghton RA, House JI, Pongratz J, van der Werf GR, DeFries RS, Hansen MC, Le Quéré C, Ramankutty N (2012). Carbon emissions from land use and land-cover change. <i>Biogeosciences</i> , 9, 5125–5142.	LUCC对碳循环的影响, 作者在2017年对相关研究又进行了更新, 发表在 <i>Global Biogeochemical Cycles</i> 上 The impact of LUCC on carbon cycle. The authors updated the data in 2017 and published the new results in <i>Global Biogeochemical Cycles</i>
7	Pielke RA Sr, Marland G, Betts RA, Chase TN, Eastman JL, Niles JO, Niyogi DS, Running SW (2002). The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. <i>Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering</i> , 360, 1705–1719.	全面量化LUCC对气候的影响, 特别是对区域尺度气候的影响 Quantifying the impacts of LUCC on climate, especially on regional scale climate
8	Falcucci A, Maiorano L, Boitani L (2007). Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. <i>Landscape Ecology</i> , 22, 617–631.	以意大利为例, 探讨LUCC对生物多样性的影响 Taking Italy as an example to explore the impact of LUCC on biodiversity
9	Liu J, Zhang Z, Xu X, Kuang W, Zhou W, Zhang S, Li R, Yan C, Yu D, Wu S, Jiang N (2010). Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. <i>Journal of Geographical Sciences</i> , 20, 483–494.	中国21世纪早期LUCC的驱动力分析, 指出中国区域发展战略的实施是LUCC的驱动力 The driving force analysis of LUCC in the early 21st century in China, suggesting the importance of the implementation of China's regional development strategy
10	Long H, Liu Y, Wu X, Dong G (2009). Spatio-temporal dynamic patterns of farmland and rural settlements in Su-Xi-Chang region: implications for building a new countryside in coastal China. <i>Land Use Policy</i> , 26, 322–333.	以中国某地区为例, 利用高分辨率遥感数据, 探讨城市化过程中的土地利用变化及相关规划政策 Taking an area in China as an example to discuss land use change and related planning policies in the process of urbanization using high-resolution remote sensing data

2 历史回顾

1993年, 国际地圈生物圈计划(IGBP)和全球环境变化的人文因素计划(IHDP)共同拟定并发表了《土地利用/土地覆盖变化科学研究计划》(1994–2005), 其主要领域是监测和模拟诸如森林砍伐和荒漠化等土地覆盖变化对自然系统的生态影响(Turner *et al.*, 1993)。随着遥感技术的发展, 全球不同尺度的土地覆盖变化的观测数据持续积累, 使得不同案例或尺度上的LUCC驱动因素及其模式得以综合分析(Lambin *et al.*, 2003), 同时, 随着土地利

用模型的开发, 使得探索分析LUCC未来情景研究逐渐成为热点(Verburg *et al.*, 1999), 逐步推动土地变化成为跨学科的研究领域, 来自社会、经济、地理、生态和环境等多个领域的科学家都积极参与其中(Turner *et al.*, 2007), 这也使得LUCC的相关研究也从最开始的土地覆盖显著变化区域转向人类与自然环境相互作用的细微变化区域, 如土地管理(Kuemmerle *et al.*, 2013), 基于生态系统服务的景观规划等(Koschke *et al.*, 2012)。

《土地利用/土地覆盖变化科学研究计划》结束后的2005年, IGBP和IHDP联合启动了为期10年的

Global Land Project (2006–2016), 并在2016年将计划更名为Global Land Programme (<https://glp.earth/>) 继续进行, 简称GLP。GLP计划的重点是关注土地上人类-环境耦合系统变化的动因、结构和性质, 并且评估这些变化对生态系统服务的影响, 从而确定包括气候变化在内的各种干扰下, 哪些人类-环境耦合系统相对脆弱, 而哪些相对可持续发展, 最终寻求促进土地系统研究和全球可持续性解决方案。GLP计划也标志着土地利用与土地覆被变化的研究领域的一体化趋势, 既关注LUCC的驱动-影响-反馈关系及其人文-自然要素, 也关注包括适应行为 (Verburg, 2006)、社会-生态系统相互作用以及跨区域远程连接(Lambin & Meyfroidt, 2011)、城-乡远程耦合等(Seto *et al.*, 2012)。因此, LUCC研究在区域与全球可持续发展中显得越发重要, 例如许多重要的全球变化挑战与土地资源的使用有关, 从而促使越来越多的学者和组织从不同学科或跨学科角度开展LUCC及相关研究。

3 核心方向的重大进展及存在的主要问题

3.1 全球多尺度土地利用及土地覆盖变化的定量研究

定量表征全球多尺度土地利用及土地覆盖变化始终是LUCC的关键基础也是最为核心的一个研究方向。在数据来源上, 1970年以前的LUCC历史数据主要是根据史料记载以及不同来源的数据清单等资料信息, 反演重建全球或区域尺度的土地利用及土地覆盖变化; 随着遥感技术和地理信息系统技术的发展, 获取全球或特定区域的多分辨率(如1 km、30 m、0.5 m等)土地利用信息变得更为便捷, 全球多尺度土地利用变化及土地覆盖变化的定量研究得到有力支撑。例如, 在全球尺度上, 通过综合不同数据来源, 研究发现1850到2015年间, 全球农田面积增加近一倍, 牧场面积增加近80%, 而森林面积减少约17% (表2)。目前, 全球尺度上比较常见的土地覆盖变化数据有HYDE (Goldewijk, 2001)和SAGE (Ramankutty & Foley, 1999); 在区域尺度上有着更多来源的资料数据, 从而支撑和实现LUCC的高精度定量集成分析, 如Liu和Tian (2010)通过综合十多个来源的历史数据, 形成了中国1970–2005年间LUCC高分辨数据集。中国土地利用与土地覆盖变化的相关数据平台主要有资源环境数据云平台、国

表2 1850–2015年几个主要地表覆盖类型的面积变化
Table 2 Area changes in major land use types from 1850 to 2015 in different regions

区域 Region	年份 Year	森林 Forest (Mhm ²)	农田 Cropland (Mhm ²)	牧场 Pasture (Mhm ²)	其他 Others (Mhm ²)
热带非洲 Tropical Africa	1850	792	78	777	781
	2015	614	241	809	765
拉丁美洲 Latin America	1850	1 248	18	229	555
	2015	932	198	564	356
南亚及东南亚 South Asia and Southeast Asia	1850	533	168	23	222
	2015	326	333	36	250
热带总计 Tropical subtotal	1850	2 573	264	1 029	1 557
	2015	1 872	772	1 408	1 371
北美洲 North America	1850	768	60	75	1 078
	2015	657	200	266	859
欧洲 Europe	1850	130	166	94	103
	2015	174	122	71	126
“苏联” “Former USSR”	1850	879	60	112	1 180
	2015	857	153	365	856
中国 China	1850	159	112	108	582
	2015	208	130	393	229
北非及中东 North Africa and the Middle East	1850	40	54	225	987
	2015	37	96	345	827
东亚 East Asia	1850	64	5	138	10
	2015	49	9	113	45
大洋洲 Oceania	1850	210	9	299	291
	2015	140	49	351	270
温带总计 Temporal subtotal	1850	2 249	466	1 050	4 231
	2015	2 123	758	1 904	3 212
全球 Global	1850	4 823	730	2 079	5 788
	2015	3 995	1 530	3 312	4 583

数据来自Houghton和Nassikas (2017)。
Data from Houghton & Nassikas, 2017.

家地球系统科学数据共享平台以及中国生态系统研究网络等。例如, 在国家科技部和中国科学院支持下, 中国科学院资源环境科学数据中心等建设完成了中国2015年包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型以及25个二级类型的土地利用现状遥感监测数据库数据集, 并在国家土地资源调查、水文、生态研究中发挥着重要作用。但是, 我们必须注意到, 在数据可靠性和精准性上, 由于历史数据不完全或者遥感影像空间分辨率等原因, 从而使得土地利用和土地覆盖变化的定量测算始终存在一定程度的不确定性和误差, 因此, 在实际工作中, 必须注意将分辨率与分析区域的研究对象及时空背景相结合。

3.2 土地利用变化对生物地球化学循环和能量流动的影响

土地利用及土地覆盖变化的重要表征就是地表植被变化, 因此LUCC也直接影响了生物地球化学循环(Grimm *et al.*, 2004), 最为典型的是影响光合作用、呼吸作用等植被相关的碳氮磷等元素循环过程。此外, LUCC对生物地球化学循环的间接影响也逐渐受到关注, 如生长季长度的变化、火发生的频率和时间、城市引起的暴风雨等也可能引起生物地球化学循环的变化(Adrianto *et al.*, 2019)。同时, LUCC还可引起或反映元素转移和空间尺度上的再分配, 例如, 从农业区向非农业区出售农产品是较大尺度的元素转移; 放牧利用中牲畜以排泄物的形式在放牧区内部的小尺度元素转移, 或向非放牧区的相对大尺度的转移, 均可影响相关化学元素的循环和时空分布变化(高英志等, 2004)。

由于生物地球化学循环过程引起的温室气体变化会对全球变化产生重要的影响, 当前有关土地利用对生物地球化学循环影响的研究热点仍然聚焦在温室气体上, 其中含碳的两种温室气体为 CO_2 和 CH_4 。1850–1990年LUCC引起的 CO_2 排放占人类活动引起的 CO_2 总排放的1/3, 但在1990–2010年间降低到1/8 (Houghton *et al.*, 2012)。Houghton和Nassikas (2017)认为2006–2015年间LUCC导致的全球净碳排放量平均为 $(1.11 \pm 0.35) \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ 且主要来自热带 $((1.41 \pm 0.17) \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1})$, 而中纬度北部为净碳汇 $((-0.28 \pm 0.21) \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1})$, 中纬度南部为碳中性(图2)。LUCC引起的净碳排放量的增加, 主要是通过两个碳循环过程的变化: 一是通过LUCC改变光合作用通量从而使植被固碳量减少, 如森林砍伐直接减少植被生物量, 从而减少生态系统的初级净生产力; 第二是通过LUCC改变呼吸作用过程, 使植物根系呼吸、凋落物分解或者土壤微生物呼吸增加(Quesada *et al.*, 2018)。目前, 关于LUCC导致的 CO_2 排放变化机制已经成为学界关注重点, 尤其在LUCC导致的林火、虫害等方面尚需要进一步关注(Lai *et al.*, 2016)。而对于 CH_4 而言, 由于 CH_4 在土壤中可以甲烷氧化菌氧化, 也可以在甲烷还原菌的作用下生成, 因此, 土壤是 CH_4 的源还是汇主要取决于甲烷氧化菌或甲烷还原菌的相对比例, 或者说氧化-还原过程的通量差值。一般来说, 通气良好的土壤如森林、草地土壤, 是大气中 CH_4 的重要的汇; 而淹水产生的厌

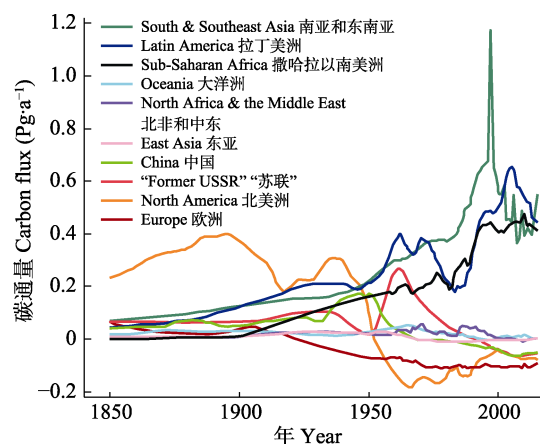


图2 全球10个地区的土地利用及土地覆被变化造成的碳年净排放量(译自Houghton和Nassikas (2017))。

Fig. 2 The net carbon emission fluxes caused by land use and land cover change in the ten regions globally (translated from Houghton & Nassikas, 2017)

氧条件, 是产甲烷菌生存的必要条件。因此, LUCC对 CH_4 排放的影响主要在湿地的排水与恢复这一土地利用变化过程(Turetsky *et al.*, 2014), 但由于这两个过程存在平衡问题并可能相互影响, 因此目前湿地生态系统的土地利用变化过程中的碳源/汇关系仍存在较大争议(Huang *et al.*, 2010, Hergoualc'h & Verchot, 2011), 而对于 CH_4 产生和消耗过程的细化和机制分析则有利于进一步了解LUCC引起的 CH_4 通量的变化(Bridgham *et al.*, 2013)。

LUCC对氮循环最为重要的影响在于由自然生态系统转换成农田过程中氮肥的使用。自1860至2000年, 由于自然系统向农田土地利用的转变, 全球农田氮的输入增加了近9倍, 其中氮肥使用由基本为0增加到 $70 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。当生态系统氮输入增加后, 氮在生态系统的一系列循环过程, 比如矿化作用、硝化作用、反硝化作用、氨挥发、氮淋失等过程, 均可能发生改变, 这些过程产生的气态氮(如 NH_3 、 N_2O 、 NO 和 HONO)排放量一般会随之增加(Wang *et al.*, 2017)。自1860至2000年, 农田排放的 NH_3 、 N_2O 、 NO 和淋溶氮流失分别增加了2.7、17、20和10倍(Wang *et al.*, 2017)。由于 N_2O 是温室气体, 其增加会加剧全球变暖, 而氮淋溶可造成水体的富营养化等问题, 因此目前相关研究主要集中在LUCC对氮的气体排放和淋溶氮的影响, 而忽略了产生气体和淋溶氮的具体氮循环过程和机制, 需要在未来加强这些方面的研究。此外, 在土地利用不变土地覆盖变化的情况下, 氮循环过程也会受到影

响,比如草地的放牧利用方式不变,利用强度增加后牲畜排泄物的增多可直接加速氮循环(李香真和陈佐忠,1997)。森林择伐一般会降低土壤氮的有效性,而对氮循环各个过程的速率的影响比较复杂,需要对多个过程的协同作用进行研究(李光耀等,2014)。研究大尺度LUCC对氮循环的影响通常需要利用模型,氮循环过程的模型模拟相关工作较碳循环的模型开发利用滞后许多(Houlton *et al.*, 2015),因此,对于氮循环过程的测定、模拟以及如何将氮循环过程更为细致地并入土地利用模型都是目前的研究热点。

LUCC不仅能够改变降水和大气湿度,还能够改变水质、土壤含水量和区域水循环过程,对全球水循环产生综合的影响(D'Almeida *et al.*, 2007)。例如,不同土地利用类型对降水的截留和下渗作用不同,不同的土地覆盖的蒸腾作用也不同,因此对水循环影响深远。直接评估LUCC对水循环的影响可采用实验流域法或特征变量时间序列法(李秀彬,2002)。如选择某一特征变量(如蒸散发、径流系数等)观测其在土地利用变化条件下的长期变化。但该方法一般适用于小尺度且空间变异不大的区域,而相对大尺度的研究则需要利用SHE、HEC-1、DDRM以及SWAT等相关水文模型。

LUCC还能够改变地表物理特性如地表反照率和地表能量平衡(潜热和显热)(Findell *et al.*, 2009)。例如,有很多研究发现,在自然植被向农田转化的地区,由于反照率的变化,局部气温发生变化(Fall *et al.*, 2010; Karl *et al.*, 2012);森林砍伐通过改变反照率和蒸腾,可能改变热带辐合带的位置,从而改变整个季风区的降水量(Devaraju *et al.*, 2015);观测和模拟研究表明,灌溉农业的引入可以改变区域温度和降水,如美国加州的农田灌溉使日最高温度降低约4 °C (Bonfils & Lobell, 2007),且灌溉使加州中央谷地农田的温度冷却3–7 °C,并使相对湿度增加9%至20%(Sorooshian *et al.*, 2011)。此外,需要注意的是,城市“热岛效应”相关研究亦趋于细化城市土地利用方式所造成的小尺度微气候变化(Niyogi *et al.*, 2011),而评估LUCC对气候的影响则需要依赖气候模型,这也反映了LUCC与其影响结果之间的交互作用及其在定量分析模型上的跨学科趋势。近十几年来,高分辨率的气候模式(RegCM2, RegCM3, RAMS, RI-EMS, RegCM-NCC, IPCR-RegCM等)虽

然得到了广泛应用,但是这些模式对碳循环和植被动态考虑较少,因此开发集成气候模式与LUCC的综合模型,是未来重要的研究方向。

3.3 土地利用及土地覆盖变化对生态系统功能和服务及生物多样性的影响

生态系统服务功能及生物多样性与人类福利息息相关,LUCC是生态系统服务功能退化的主要驱动力,也是影响生物多样性的关键驱动力。人类活动影响下的土地利用变化,打破了原有的土地利用模式,改变了地表植被格局和结构,并导致土壤养分状态、污染物富集等发生状态改变(潘佩佩等,2012),从而促使生态系统过程、功能和服务也随之改变。生态系统功能和服务主要包含生产力、土壤保持、水质或空气净化、水源涵养、固碳存氮等,LUCC会对生态系统部分甚至全部功能产生影响。目前,生态系统功能和服务核算方式主要包含物理量化(例如有多少吨碳储量或生产多少吨水),经济价值量化(货币化不同生态系统服务)或者生态经济方式(例如将生态、经济服务等统一转换为太阳能值等)(Zhao *et al.*, 2000)。相比较而言,具体的物理量化方式更容易理解并具有现实意义,而生态系统服务的经济价值(ESV)量化法则可评估多种生态系统服务,帮助决策和保障不同利益相关者的利益(Viglizzo *et al.*, 2012; Bateman *et al.*, 2013),但相对忽视生态系统过程(Zhao *et al.*, 2000)。近年来,诸多学者基于生态系统服务价值开展了LUCC的相关研究,并取得了较为丰硕的成果,例如揭示了城市化等引起的土地利用变化对生态系统服务价值的影响,但我们必须注意到,土地利用变化是人类活动对生态系统产生影响的最主要方式,如何将土地利用变化与生态系统服务功能的价值核算进行高精度高分辨率的时空分解,依然是目前面临的重要挑战。

生物多样性是维持生态系统稳定、服务和功能的重要因素,而LUCC有可能促使生境条件发生变化,例如生境丧失或破碎化等,从而影响生物多样性。例如,农牧业的发展有利于改良某些物种,但伴随的杀虫剂等的使用又可能导致某些物种种群减少乃至灭绝。大量研究表明,城市化是生物多样性丧失的一个重要驱动力,根据Seto等(2012)估算,2030年城市土地覆盖大约是2000年全球城市土地面积的3倍,有可能导致主要生物多样性热点生境大量丧失,使极度濒危及濒危物种在非洲和欧洲分别减少

30%和33%, 在美洲减少比例没那么多, 但是数量高达134个物种; Pandit等(2007)指出按照目前的森林采伐速率, 印度喜马拉雅地区到2100年将仅剩10%的陆地面积覆盖茂密的森林(>40%的树冠覆盖), 导致约1/4的特有种灭绝, 其中包括355种特有维管植物和35个特有脊椎动物。当前的有关LUCC对生物多样性影响的研究主要集中在物种水平, 主要原因在于物种优势度、丰富度、种间关系、物种分布格局、物种入侵和灭绝等因素均较易量化及测定追踪(吴建国和吕佳佳, 2008); 但在基因水平上, 多样性的测定和量化标准尚不明确, 而其与土地利用变化的耦合关系及交互机制需要进一步研究。同时, 我们也注意到, 将空间尺度纳入生物多样性研究而形成的多维生物多样性概念已经被学者提出并得到迅速传播发展(Nacem *et al.*, 2016), 对其量化和预测仍需要更多的论述, 因此是未来研究LUCC对多样性影响的一个重要方向。

4 前沿方向展望及建议优先领域

LUCC是全球环境变化的重要组成部分和主要驱动因素, 也是影响和表征全球可持续发展的重要指标。人类活动驱动的土地利用是影响陆地系统演化的核心人文要素, 而LUCC不仅带来和反映了地表及地上地下景观结构的变化, 而且对生态系统服务功能也造成重要影响, 因此, LUCC对生态系统的影响始终是国际上生态学和地理学等跨学科研究的热点, 而通过土地利用的有序调控以维持或提升生态系统服务功能, 对于实现联合国可持续发展目标2030、巴黎协定等亦具有重要决策关联价值。目前及未来一段时期, 在LUCC对生态系统影响领域, 依然存在着若干亟待解决或突破的关键科学问题。

第一, 进一步提升观测水平, 强化定量表征。由于在衡量土地利用变化强度与速率以及在生态系统要素组成与功能方面存在的双重不确定性, 使得LUCC对生态系统影响的表达存在更大的不确定性和高灵敏性, 因此, 如何进一步提升数据精度, 以构建多尺度、多要素、多主体的土地利用与土地覆盖变化对生态系统影响的综合评估动态模型, 依然任重道远, 需要更多的地理、生态、环境乃至社会、计算等不同学科领域的通力协作; 同时, 在科研基础设施上, 需要进一步加强野外观测台站的数量和质量建设, 同时需要创新增设以人类活动为主要观

测对象的城乡台站(如城市化观测台站)建设, 推动土地利用变化人文自然要素信息的同步观测和信息集成, 研发多源异构数据的获取、处理、分析和可视化表达技术, 探索建立数据保护与共享机制, 促进土地利用变化和生态系统数据的协同增值。

第二, 进一步加强过程认知, 侧重关系表达。既有研究结果已经表明, 土地利用与土地覆盖变化过程给陆地等生态系统带来了重大影响, 但既有的LUCC相关研究主要依赖统计数据 and 模型, 在LUCC对生态系统的影响机理和具体路径上依然是个“黑盒子”, 而且由于土地利用与生态系统的时空异质性特征, 使得这个“黑盒子”的内部亦是一个时空动态变化过程。因此, 迫切需要更多的区域实证研究和理论推演, 以进一步加强对土地利用变化过程的理解, 充分掌握其人文-自然驱动机制, 通过大数据分析等手段, 进一步科学识别社会-生态系统的组成要素在LUCC和生态系统演化中的作用路径、作用方式、作用强度、作用频率及其耦合关系表达和多尺度响应, 对科学调控人类的土地利用行为以改善和提升区域生态服务功能具有重要的科学意义。

第三, 进一步加强决策关联, 服务政策制定。土地利用与土地覆盖变化通过对生态系统格局与过程的影响, 改变着生态系统产品与服务的供应能力; 而生态系统服务的丧失或降低, 将会对人类福祉产生严重影响, 直接威胁区域乃至全球的生态安全和可持续发展目标的实现。我们必须注意到, 目前关于LUCC与生态系统影响的研究, 在决策服务关联上还存在着较多的不足或空白之处。因此, 迫切需要进一步加强LUCC对区域生态系统服务的种类组成、生成机理、决策关系及不同决策情景下的社会-生态后果等方面的研究, 以生态系统服务为基本约束条件, 服务提升土地资源的合理配置与使用。当前, 中国正进入新时代, 在社会-生态系统领域, 面临着一系列的深刻变革和发展目标, 例如到2035年基本实现“美丽中国”目标等, 这些都需要通过调整目前的土地利用方式并同步提升生态系统服务功能才能实现。因此, 在未来研究中, 应持续注重研究的多学科交叉的属性, 将自然因素与社会经济因素充分结合, 关注政策法规等决策支持系统, 建立具有中国特色的人地关系理论, 实现对土地利用与土地覆盖变化的完整认识, 提高预测和情景分析能

力, 提出解决人地矛盾, 实现可持续发展的方案, 架起科学和决策之间的桥梁, 为政府决策提供科学支撑。

致谢 感谢北京大学方精云教授、王志恒教授, 中国科学院地理科学与资源研究所牛书丽研究员, 中国科学院生态环境研究中心陈保冬研究员等在文章撰写过程中给予的指导, 感谢东北师范大学樊宪磊在制图和格式上的修改工作。

参考文献

- Adrianto HA, Spracklen DV, Arnold SR (2019). Relationship between fire and forest cover loss in Riau Province, Indonesia Between 2001 and 2012. *Forests*, 10, 889. DOI: 10.3390/f10100889.
- Bateman IJ, Harwood AR, Mace GM, Watson RT, Abson DJ, Andrews B, Binner A, Crowe A, Day BH, Dugdale S, Fezzi C, Foden J, Hadley D, Haines-Young R, Hulme M, Kontoleon A, Lovett AA, Munday P, Pascual U, Paterson J, Perino G, Sen A, Siriwardena G, van Soest D, Terman-sen M (2013). Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. *Science*, 341, 45–50.
- Bonfils C, Lobell D (2007). Empirical evidence for a recent slowdown in irrigation-induced cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 13582–13587.
- Bridgman SD, Cadillo-Quiroz H, Keller JK, Zhuang Q (2013). Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, 19, 1325–1346.
- D'Almeida C, Vörösmarty CJ, Hurtt GC, Marengo JA, Dingman SL, Keim BD (2007). The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology*, 27, 633–647.
- Devaraju N, Bala G, Modak A (2015). Effects of large-scale deforestation on precipitation in the monsoon regions: remote versus local effects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 3257–3262.
- Ellis EC, Goldewijk KK, Siebert S, Lightman D, Ramankutty N (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 589–606.
- Falcucci A, Maiorano L, Boitani L (2007). Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. *Landscape Ecology*, 22, 617–631.
- Fall S, Diffenbaugh NS, Niyogi D, Pielke RA, Rochon G (2010). Temperature and equivalent temperature over the United States (1979–2005). *International Journal of Climatology*, 30, 2045–2054.
- Findell KL, Pitman AJ, England MH, Pegion PJ (2009). Regional and global impacts of land cover change and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 22, 3248–3269.
- Gao YZ, Han XG, Wang SP (2004). The effects of grazing on grassland soils. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 790–797. [高英志, 韩兴国, 汪诗平 (2004). 放牧对草原土壤的影响. *生态学报*, 24, 790–797.]
- Goldewijk KK (2001). Estimating global land use change over the past 300 years: the HYDE Database. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 417–433.
- Grimm NB, Arrowsmith JR, Eisinger C, Heffernan J, Macleod A, Lewis DB, Prasad L, Rychener T, Roach WJ, Sheibley RW (2004). Effects of urbanization on nutrient biogeochemistry of aridland streams//Defries RS, Asner GP, Houghton RA. *Ecosystems and Land Use Change*. American Geophysical Union, Washington. 129–146.
- Hergoualc'h K, Verhot LV (2011). Stocks and fluxes of carbon associated with land use change in Southeast Asian tropical peatlands: a review. *Global Biogeochemical Cycles*, 25, GB2001. DOI: 10.1029/2009GB003718.
- Houghton RA, House JJ, Pongratz J, van der Werf GR, DeFries RS, Hansen MC, Le Quere C, Ramankutty N (2012). Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*, 9, 5125–5142.
- Houghton RA, Nassikas AA (2017). Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. *Global Biogeochemical Cycles*, 31, 456–472.
- Houlton BZ, Marklein AR, Bai E (2015). Representation of nitrogen in climate change forecasts. *Nature Climate Change*, 5, 398–401.
- Huang Y, Sun W, Zhang W, Yu Y, Su Y, Song C (2010). Marshland conversion to cropland in northeast China from 1950 to 2000 reduced the greenhouse effect. *Global Change Biology*, 16, 680–695.
- Hurtt GC, Chini LP, Frolking S, Betts RA, Feddema J, Fischer G, Fisk JP, Hibbard K, Houghton RA, Janetos A, Jones CD, Kindermann G, Kinoshita T, Goldewijk KK, Riahi K, Shevliakova E, Smith S, Stehfest E, Thomson A, Thornton P, van Vuuren DP, Wang YP (2011). Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*, 109, 117–161.
- Karl TR, Gleason BE, Menne MJ, McMahon JR, Heim RR, Brewer MJ, Kunkel KE, Arndt DS, Privette JL, Bates JJ, Groisman PY, Easterling DR (2012). U.S. temperature and drought: recent anomalies and trends. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93, 473–474.
- Koschke L, Furst C, Frank S, Makeschin F (2012). A

- multi-criteria approach for an integrated land-cover-based assessment of ecosystem services provision to support landscape planning. *Ecological Indicators*, 21, 54–66.
- Kuemmerle T, Erb K, Meyfroidt P, Muller D, Verburg PH, Estel S, Haberl H, Hostert P, Jepsen MR, Kastner T, Levers C, Lindner M, Plutzer C, Verkerk PJ, van der Zanden EH, Reenberg A (2013). Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 484–493.
- Lai L, Huang X, Yang H, Chuai X, Zhang M, Zhong T, Chen Z, Chen Y, Wang X, Thompson JR (2016). Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, 2, e1601063. DOI: 10.1126/sciadv.1601063.
- Lambin EF, Geist HJ, Lepers E (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205–241.
- Lambin EF, Meyfroidt P (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 3465–3472.
- Li GY, Yang XD, Shi QR, Ma WJ, Wang XH, Yan ER (2014). Effects of clear-felling on soil nutrient pools and nitrogen mineralization and nitrification in Tiantong, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 709–715. [李光耀, 杨晓东, 史青茹, 马文济, 王希华, 阎恩荣 (2014). 浙江天童森林砍伐对土壤养分库和氮矿化-硝化特征的影响. 生态学杂志, 33, 709–715.]
- Li XZ, Chen ZZ (1997). Nitrogen loss and management in grazed grassland. *Climatic and Environmental Research*, 2(3), 44–53. [李香真, 陈佐忠 (1997). 放牧草地生态系统中氮素的损失和管理. 气候与环境研究, 2(3), 44–53.]
- Liu JY, Zhang ZX, Xu XL, Kuang WH, Zhou WC, Zhang SW, Li RD, Yan CZ, Yu DS, Wu SX, Nan J (2010). Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. *Journal of Geographical Sciences*, 20, 483–494.
- Liu ML, Tian HQ (2010). China's land cover and land use change from 1700 to 2005: estimations from high-resolution satellite data and historical archives. *Global Biogeochemical Cycles*, 24, 18.
- Long HL, Liu YS, Wu XQ, Dong GH (2009). Spatio-temporal dynamic patterns of farmland and rural settlements in Su-Xi-Chang region: implications for building a new countryside in coastal China. *Land Use Policy*, 26, 322–333.
- Naeem S, Prager C, Weeks B, Varga A, Flynn DFB, Griffin K, Muscarella R, Palmer M, Wood S, Schuster W (2016). Biodiversity as a multidimensional construct: a review, framework and case study of herbivory's impact on plant biodiversity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283, 20153005. DOI: 10.1098/rspb.2015.3005.
- Niyogi D, Pyle P, Lei M, Arya SP, Kishtawal CM, Shepherd M, Chen F, Wolfe B (2011). Urban modification of thunderstorms: an observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 1129–1144.
- Pan PP, Yang GS, Su WZ (2012). Progress on effects of land use change on land productivity. *Progress in Geography*, 31, 539–550. [潘佩佩, 杨桂山, 苏伟忠 (2012). 土地利用变化对土地生产力的影响研究进展. 地理科学进展, 31, 539–550.]
- Pandit MK, Sodhi NS, Koh LP, Bhaskar A, Brook BW (2007). Unreported yet massive deforestation driving loss of endemic biodiversity in Indian Himalaya. *Biodiversity and Conservation*, 16, 153–163.
- Pielke RA Sr., Marland G, Betts RA, Chase TN, Eastman JL, Niles JO, Niyogi DDS, Running SW (2002). The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions Series A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 360, 1705–1719.
- Quesada B, Arneeth A, Robertson E, de Noblet-Ducoudré N (2018). Potential strong contribution of future anthropogenic land-use and land-cover change to the terrestrial carbon cycle. *Environmental Research Letters*, 13, 064023. DOI: 10.1088/1748-9326/aac4c3.
- Ramankutty N, Foley JA (1999). Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 997–1027.
- Seto KC, Guneralp B, Hutyrá LR (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 16083–16088.
- Sorooshian S, Li J, Hsu K-I, Gao X (2011). How significant is the impact of irrigation on the local hydroclimate in California's Central Valley? Comparison of model results with ground and remote-sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 116, D06102. DOI: 10.1029/2010JD014775.
- Turetsky MR, Kotowska A, Bubier J, Dise NB, Crill P, Hornbrook ERC, Minkinen K, Moore TR, Myers-Smith IH, Nykänen H, Olefeldt D, Rinne J, Saarnio S, Shurpali N, Tuittila E-S, Waddington JM, White JR, Wickland KP, Wilmking M (2014). A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Global Change Biology*, 20, 2183–2197.
- Turner BL, Lambin EF, Reenberg A (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 20666–20671.
- Turner DP, Koerper G, Gucinski H, Peterson C, Dixon RK (1993). Monitoring global change: comparison of forest

DOI: 10.17521/cjpe.2020.0071

- cover estimates using remote sensing and inventory approaches. *Environmental Monitoring and Assessment*, 26, 295–305.
- Verburg PH (2006). Simulating feedbacks in land use and land cover change models. *Landscape Ecology*, 21, 1171–1183.
- Verburg PH, Veldkamp A, Fresco LO (1999). Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China. *Applied Geography*, 19, 211–233.
- Viglizzo EF, Paruelo JM, Laterra P, Jobbágy EG (2012). Ecosystem service evaluation to support land-use policy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154, 78–84.
- Wang C, Houlton BZ, Dai W, Bai E (2017). Growth in the global N₂ sink attributed to N fertilizer inputs over 1860 to 2000. *Science of The Total Environment*, 574, 1044–1053.
- Wu JG, Lü JJ (2008). Effects of land use change on the biodiversity. *Ecology and Environment*, 17, 1276–1281. [吴建国, 吕佳佳 (2008). 土地利用变化对生物多样性的影响. *生态环境*, 17, 1276–1281.]
- Zhao J, Xiao H, Wu G (2000). Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11, 290–292.
- Li XB (2002). Study on hydrologic and water resource effects of land use and land cover change: social demand and scientific issues//Committee of Physical Geography, Geographical Society of China. *Land Use and Land Cover Change and Its Environmental Effects*. Planet Map Press, Beijing. [李秀彬 (2002). 土地覆被变化的水文水资源效应研究——社会需求与科学问题//中国地理学会自然地理专业委员会. 土地覆被变化及其环境效应. 星球地图出版社, 北京.]

特邀编委: 牛书丽 责任编辑: 李 敏