DOI: 10.5846/stxb201903150492

范泽孟,李赛博.新亚欧大陆桥经济走廊土地覆被变化及驱动力的定量分析.生态学报,2019,39(14): - . Fan Z M, Li S B.Change pattern of land cover and its driving force since 2001 in the New Eurasian Continental Bridge Economic Corridor .Acta Ecologica Sinica,2019,39(14): - .

新亚欧大陆桥经济走廊土地覆被变化及驱动力的定量 分析

范泽孟1,2,3,*,李赛博1,2

1 中国科学院地理科学与资源研究所,资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101
 2 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049
 3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023

摘要:针对年际间的土地覆被变化的空间分异特性及驱动机理解析问题,采用 Python 和 R 语言构建了土地覆盖变化的时空动 态概率模型和驱动力综合分析模型,实现了 21 世纪以来"新亚欧大陆桥经济走廊(NECBEC)"土地覆盖时空动态变化特征及驱 动机理的定量分析。研究结果表明,在 2001—2017 年间,NECBEC 的土地覆盖变化总体呈现出三增(草地、耕地和建设用地分 别增加 11457 万 hm²、841 万 hm²和 396 万 hm²)和三减(林地、水域和湿地、和未利用地分别减少 7409 万 hm²、4659 万 hm²和 626 万 hm²)趋势。其中,未利用地和林地主要转换为草地,而草地则主要转为林地和耕地。建设用地年际增加幅度最大,其新增面 积中耕地贡献达到 50%。另外,自 2013 年"一带一路"倡议启动以来,NECBEC 区域的各种土地覆盖类型之间的相互转换幅度 呈现明显增加趋势,而 NECBEC 沿线国家之间的社会经济发展综合水平集聚性总体上呈减弱趋势,其中综合得分高高聚集区 和低低聚集区分别集中在西欧和中亚北部。NECBEC 区域的社会经济发展对耕地和建设用地的时空差异性尤为显著。土地覆 盖类型在面积变化量和变化速率上,均具有明显的时空分异性。不同的经济发展综合水平对 LUCC 的类型演替、格局变化和驱 动效应不同。

关键词:LUCC 时空格局;时空动态概率模型;定量分析;新亚欧大陆桥经济走廊

Change pattern of land cover and its driving force since 2001 in the New Eurasian Continental Bridge Economic Corridor

FAN Zemeng^{1,2,3,*}, LI Saibo^{1,2}

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: To explicitly understand the different characteristics of interannual variabilities in land cover distribution, a dynamic probability model of spatio-temporal change and an integrated analysis model of driving forces in land cover change were developed to compute spatio-temporal dynamic probability of land cover change, and explain the relationship between land cover change and social economic development. Python and R programming languages were operated in the New Eurasian Continental Bridge Economic Corridor (NECBEC) area. The results show that 1) grassland, cultivated land, and

收稿日期:2019-03-15; 修订日期:2019-06-07

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: fanzm@lreis.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0507202, 2017YFA0603702, 2017YFC0503806);中国科学院先导专项A类项目课题(XDA20030203);国家自然科学基金项目(41271406, 41421001);资源与环境信息系统国家重点实验室自主部署创新研究计划项目(088RA600YA)

build-up land of the NECBEC has increased by 114.57 million hm², 8.41 million hm² and build-up 3.96 million hm², respectively, and forest land, unutilized land, and water area and wetland has decreased by 74.09 million hm², 46.59 million hm², and 6.26 million respectively, from 2001 to 2017. 2) Forest and unutilized land were mainly transformed to grassland, and grassland was mainly transformed to forest and cultivated land. 3) Build-up land has the largest annual increase rate, 50% of which comes from the cultivated land. Moreover, since the launch of the "Belt and Road Initiative" in 2013, the gap of the socio-economic development comprehensive level has gradually decreased, in which the Western Europe area has the highest development index and the Northern Central Asia area has the lowest development index. Impacts of the socio-economic development in land cover change have shown a significant spatio-temporal different characteristic, especially for the distribution change of cultivated land and build-up land. In general, the speed of land cover change has a significantly accelerated trend with the rapid socio-economic development in the NECBEC area.

Key Words: Land cover change; Spatio-temporal distribution pattern; Dynamic probability model of land cover change; Socio-economic factors; NECBEC

土地覆被变化作为人类活动对地球表层系统影响最直接的表现形式^[1],其时空格局变化直接引起地表 能量平衡、碳循环、水循环和物种多样性等地球系统要素发生的变化^[2-5],进而影响到国家或区域的生态安 全、粮食安全及社会经济可持续发展。自 1995 年国际地圈-生物圈计划(IGBP)和人文领域计划(IHDP)研究 计划^[6]启动以来,国内外学者在土地利用覆盖变化的驱动机理^[7-9]、模拟预测^[10-15]等方面开展了大量的研究 工作。譬如,Lambin 等研究认为人类行为及地区经济活动对土地利用变化具有巨大驱动作用^[15]。马晴等^[16] 在对疏勒河下游绿洲土地利用变化的驱动力分析中认为人口、政策、城市化程度和经济水平等社会经济因子 是绿洲变化的主要驱动因子。刘纪元等^[17]认为自然地理、经济发展与国家宏观政策的综合作用是 21 世纪初 中国土地利用变化主要驱动力。另外,随着"一带一路"倡议成为世界上越来越多国家和政治领袖们的一种 共识,开展"一带一路"沿线国家和区域的土地覆盖空间格局及驱动机理的定量分析,将为"一带一路"倡议的 顺利实施提供重要的科学数据和辅助决策依据。自 2013 年"一带一路"倡议提出,学术界对"一带一路"沿线 国家及区域的研究也迅速升温^[18],并分析了"一带一路"战略与经济全球化及世界格局变化的关系及空间内 涵,认为"一带一路"是统筹中国全面对外开放的国家战略^[19]。吴绍洪(2018)等结合模型模拟、情景预估等 技术手段,预估了"一带一路"未来 30 年高温热浪、干旱等极端事件的灾害风险及粮食生产等渐变事件的 风险^[20]。

综上所述,目前在土地覆盖变化的驱动机理研究,在方法上,主要采用主成分分析、灰度关联分析等,很少 考虑研究对象所具有空间分异性;在时间上,主要考虑时间段上的驱动机理,很少考虑年际间的动态性;在空 间上,主要以自然区域或行政区域为研究单元,很少从栅格尺度上研究驱动机理。尤其是针对"新亚欧大陆 桥经济走廊"土地覆盖变化的时空动态特征及驱动机理分析的研究则尤为很少涉及。因此,论文旨在构建土 地覆盖变化的时空动态概率模型的基础上,定量计算"新亚欧大陆桥经济走廊"土地覆盖类型在栅格尺度上 的时空动态概率及变化,进而构建土地里覆盖变化驱动力的综合分析模型,揭示 21 世纪以来"新亚欧大陆桥 经济走廊"的经济发展水平与时空集聚性及其对土地覆盖类型空间格局的驱动作用和贡献系数,进而为"一 带一路"倡议中各种重大工程的顺利实施提供辅助决策方法和科学数据支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

新亚欧大陆桥经济走廊(The New Eurasian Continental Bridge Economic Corridor, NECBEC)东起中国江苏 省连云港市,西至荷兰鹿特丹港,辐射亚欧大陆面积约5071km²,约占世界总面积36%;居住人口42亿多,占 世界人口的75%左右^[21](图1)。中国国内主要由陇海铁路和兰新铁路组成,出国境后经三条路线抵达荷兰 的鹿特丹港,其西端连接的是西欧经济发达地区,东端连接的是充满活力的亚太地区和发展最快的中国东部 沿海地区,而大陆桥经过的中部地区则是资源丰富、潜力巨大的中国西部地区、俄罗斯、中亚及东欧国家^[17]。 另外,随着国家西部大开发、中部崛起战略的相继实施,沿桥经济区正在迅速崛起,陆桥经济也呈现出活跃发 展势头。因此,新亚欧大陆桥在未来亚欧大陆经济发展及我国东中西部协调发展中将发挥更大的作用。



Fig.1 Boundary map of study area

1.2 数据与处理

研究数据主要包括 2001—2017 年的 500m 分辨率的土地覆被数据(MCD12Q1)及沿线国家的社会经济数据,分别源于美国 NASA 网站的 MODIS 数据集(https://www.nasa.gov)、联合国粮食及农业组织(http://www.fao.org)及世界银行集团(https://data.worldbank.org)。根据马里兰大学(UMD)植被分类系统,并结合国内外的其他土地土地覆被分类系统^[22-24],对土地覆被数据合并为耕地、林地、草地、水域和湿地、建设用地、未利用地六种类型。

1.3 土地覆被变化时空动态概率模型

土地覆盖变化是各种自然要素、气候条件、人为作用等诸多因子共同作用的一个复杂过程^[20],如果仅对 自然区域或行政区域上某一时间段的土地覆被变化面积量及驱动机理进行研究,而忽略栅格异质性和年际间 不确定性,往往会加大空间和时间粗糙度,将导致机理研究分辨率不足。针对此问题,在栅格层次上构建了土 地覆被变化的时空动态概率模型,其理论公式可表达如下:

$$DT_{k} = (|\Delta S_{k,\text{in}}| + |\Delta S_{k,\text{out}}|)/S_{k,t}$$

$$\tag{1}$$

$$DW_{k} = \begin{cases} DT_{k} / \sum_{i=1}^{i=6} DT_{i}, DT_{k} < 1 \\ I = DT_{k} / DT_{k} < 1 \end{cases}$$
(2)

$$(\mathbf{1}, DT_k \ge \mathbf{1})$$

$$DM(x,y)_{k} = (1/T,0)$$
 (3)

$$STDP(x,y)_{k} = \sum_{i=1}^{j=m} DW_{k} \times DM(x,y)_{k,j}$$

$$\tag{4}$$

式中,(x,y)是栅格单元坐标,k 为某一种土地覆盖类型;i 为1到6的土地覆盖类型编码;j 为t到t+1时段的 年度时间间隔值; DT_k 和 DW_k 分别代表t到t+1时段内第k类土地覆盖类型的动态趋势和权重指数; $\Delta S_{k,in}$ 和 $\Delta S_{k,out}$ 分别代表t到t+1时段内第k类土地覆盖类型的增加和减少值; $S_{k,i}$ 为t时期第k类土地覆盖的总面积; DT_i 代表t到t+1时段内第i类土地覆盖类型的动态趋势; $DM(x,y)_k$ 表t到t+1时段内第k类土地覆盖类型 在栅格(x,y)处的年际间动态变化值; $T \ge t$ 和t+1时段内两个时段内的年度间隔值;STDP(x,y)_k为t到t+1 时段内第k类土地覆盖类型在栅格(x,y)处的综合时空动态概率,其值在0到1之间。

土地覆盖时空动态概率模型的关键步骤包括: ①根据土地覆被类型数据,构造 t 时段和 t +1 时段间的第 k类土地覆盖类型的时空转移矩阵 $T(x,y)_k$ 、趋势度矩阵 DT_k 、趋势度权重矩阵 DW_k 及年际间动态变化值 DM $(x,y)_k$; ②判断栅格(x,y)处在年际间的 k 地类属性值是否相等,若不相等则该栅格因子为 1/T,否则为 0; ③ 判断栅格单元的 t 时段和 t +1 时段的地类属性值是否相等,若不相等则认为 T 年间该像元地类必发生变化, 则其时空动态概率 $STDP(x,y)_k$ 为 1;若相等则再根据年际间动态变化值 $DM(x,y)_k$ 和趋势度权重矩阵 DW_k 进 行逐年求和;④重复步骤三,直到将每一个栅格单元的 $STDP(x,y)_k$ 都进行计算完为止,从而获得 N 年间的土 地覆被变化的时空动态概率数据。

1.4 土地覆被变化驱动机理综合分析模型

考虑到土地覆被变化的空间分异性,基于 K-Means 聚类分级后的因子,运用地理探测器对土地覆盖变化 的驱动机理进行动态分析。同时针对"新亚欧大陆桥经济走廊"各个国家经济发展水平的时空差异性,采用 主成分分析和局部 Moran's I 分析方法,对 NECBEC 区域的社会经济发展水平及时空集聚性进行综合识别。 地理探测器(http://www.geodetector.org)作为探测空间分异性及其驱动因子的统计学方法,能够在度量空间 分异性的同时,对空间分异性所隐含的独特信息解释^[25-26]。公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h}^{L} N_h \sigma_h^2$$
⁽⁵⁾

式中,q为土地覆被变化空间分异影响因素的探测力指标; N_h 为次一级区域样本单元数;N为整个区域样本单元数;L为次级区域个数; σ^2 为整个区域土地覆被变化时空动态概率 STDP 的方差; σ_h^2 为次一级区域的方差。 q的取值区间为[0,1],q=0时,表明 STDP 是随机分布的,q 值越大,说明分区的社会经济要素对 STDP 的影响越大。

2 结果分析

2.1 土地覆被空间分布格局及其转换趋势

2001—2017年的新亚欧大陆桥经济走廊土地覆被类型时空分布(图2)显示:草地、和未利用地是最主要的用地类型。其中,草地主要分布在中国内蒙古高原、青藏高原及南部丘陵地区,俄罗斯的中西伯利亚高原与东西伯利亚山地地区,以及蒙古国的北部地区和哈萨克斯坦半干旱区,占整个区域的44.53%;未利用地主要分布在中国西北地区,蒙古国南部地区,伊朗高原及中亚的卡库拉姆沙漠和克孜勒库姆沙漠地区,占整个区域的33.89%。而林地、耕地和建设用地总共仅占整个区域的21.58%,其中林地主要分布在俄罗斯的东欧平原、北部地区,中国东北地区、东南丘陵地区及欧洲西部地区,占整个区域的9.05%;耕地主要分布在中国的东北平原、华北平原、长江中下游平原与四川盆地地区,以及欧洲西部和俄罗斯西南地区,占整个区域的7.92%;建设用地主要分布在与耕地邻近的区域,其面积仅占整个区域的4.63%。

新亚欧大陆桥土地覆被的变化速率在 2001、2005、2009、2013 及 2017 年均呈现不同的时空分异性(表 1,

5



图 2 新亚欧大陆桥的土地覆被的时空分布格局 Fig.2 Spatio-temproal pattern of land cover change in NECBEC

图 3)。分析结果显示,土地覆被无论是在变化量上,还是在变化速率上都具有明显的时空分异性:在 2001-2017 年期间,呈现三增三减趋势,即草地、耕地及建设用地动态度(土地利用年均变化率)均为正,表明土地覆被均有所增加,分别增加 11457 万 hm²、841 万 hm²及 396 万 hm²,其年增加幅度大小依次为建设用地>草地>耕地。其中,新增草地主要来源于林地(贡献 70%),增加区域主要集中在西欧的温带大陆性气候、地中海气候区,俄罗斯的林草用地交错区,尤其是斯洛文尼亚增长幅度最大,而草地的减少也以林地扩张为主(贡献 69.72%);另外,建设用地的增加主要来自于对耕地的占用(贡献 50%),尤其是中国东部沿海地区及天山北坡经济带,这与 21 世纪以来中国经济水平快速发展密切相关,其次是土耳其,阿塞拜疆和俄罗斯。耕地扩张几乎全来源于草地(贡献 98%),其中,中国西北区域耕地轻度增加,东欧地区耕地增加显著。林地、未利用地及水域和湿地均有所减少,分别减少 7409 万 hm²、4659 万 hm²及 626 万 hm²。未利用地减少面积的 80%转为草地,新增草地主要分布在中国的西北、黄土高原及青藏高原区,中亚及伊朗地区,林地减少区域主要分布在俄罗斯和中国的四川盆地、广西及广东区域,尤其是阿塞拜疆和瑞士减少幅度最大。

2001—2005、2005—2009、2009—2013及2013—2017年的新亚欧大陆桥土地覆被变化对比分析表明(表1,图3):除草地外,其余各个地类在2013—2017年的变更剧烈程度均大于其他3个时期。其中,耕地虽然在2005—2009年及2009—2013年有减少趋势,但是2013—2017年增加明显,尤其是黑山共和国增加最快;水域和湿地在2013年前一直处于减少状态(水域和湿地草化),而2013年后有所增加,其中斯洛文尼亚变化速率

最显著;建设用地在4个时期一直呈现扩张趋势,中国最为明显。自2013年"一带一路"倡议启动以来,新亚 欧大陆桥的土地覆被变化动态度整体呈增速趋势,尤其是建设用地、耕地、草地及林地之间的转换强度明显高 于2013年前的土地覆被转换强度。

		Table 1	Transfer matrix	of Eand cover			
土地覆被 Land cover (占总转出比例 Proportion)	时间段 Time interval	水域和湿地 Water area and wetland	林地 Forest	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	建设用地 Build-up land	未利用地 Unutilized land
水域和湿地	2001-2005	46618.3	1021.2(25.36)	2833.6(70.38)	1.0(0.02)	3.9(0.10)	166.7(4.14)
Water area and wetland	2005—2009	45474.2	694.0(22.59)	2190.2(71.29)	1.4(0.04)	1.3(0.04)	185.2(6.03)
	2009—2013	44017.1	600.5(19.16)	2382.5(76.04)	1.1(0.03)	0.6(0.02)	148.7(4.74)
	2013—2017	44030.1	246.6(13.96)	1271.4(71.95)	1.0(0.06)	0.2(0.01)	247.8(14.02)
	2001-2017	43840.6	1639.5(24.10)	4997.7(73.45)	4.3(0.06)	8.6(0.13)	154.0(2.26)
林地 Forest	2001-2005	309.1(1.70)	390795.8	17815.9(97.75)	35.5(0.19)	0.1(0.00)	64.5(0.35)
	2005—2009	202.2(1.29)	391625.4	15187.7(97.23)	25.0(0.16)	0.2(0.00)	205.8(1.32)
	2009—2013	222.5(1.18)	391982.1	18480.2(98.07)	20.4(0.11)	0.1(0.00)	121.5(0.64)
	2013—2017	1178.1(4.45)	383812.9	25081.0(94.72)	22.3(0.08)	0.2(0.00)	197.7(0.75)
	2001-2017	1012.5(2.18)	362570.8	45012.2(96.90)	88.1(0.19)	0.7(0.00)	336.7(0.72)
草地	2001-2005	1336.1(6.05)	15218.1(68.86)	505957.5	4248.4(19.22)	43.2(0.20)	1253.8(5.67)
Grassland	2005—2009	1225.6(5.05)	18370.5(75.74)	508062.4	3385.5(13.96)	57.8(0.24)	1215.6(5.01)
	2009—2013	1242.4(5.27)	17436.9(73.95)	508216.2	3216.0(13.64)	57.0(0.24)	1628.3(6.91)
	2013—2017	4005.6(14.02)	17360.6(60.78)	507193.8	5207.7(18.23)	73.5(0.26)	1916.7(6.71)
	2001-2017	4102.0(7.79)	36728.9(69.72)	475377.5	9025.4(17.13)	186.0(0.35)	2637.3(5.01)
耕地	2001-2005	5.8(0.16)	34.5(0.97)	3452.6(97.61)	91504.5	43.4(1.23)	1.0(0.03)
Cultivated land	2005—2009	5.6(0.14)	38.1(0.96)	3894.1(97.86)	91813.1	38.8(0.97)	2.8(0.07)
	2009—2013	3.8(0.09)	46.1(1.03)	4405.0(97.93)	90729.1	34.1(0.76)	9.2(0.20)
	2013—2017	23.8(0.72)	53.6(1.61)	3211.5(96.62)	90646.5	31.5(0.95)	3.3(0.10)
	2001-2017	48.4(0.58)	201.1(2.42)	7871.5(94.55)	86716.6	190.4(2.29)	13.6(0.16)
未利用地	2001-2005	277.0(10.19)	176.6(6.49)	2257.8(83.02)	3.2(0.12)	5.1(0.19)	107986.8
Unutilized land	2005—2009	242.7(8.64)	99.0(3.52)	2462.4(87.67)	2.4(0.09)	2.1(0.07)	106664.2
	2009—2013	311.3(11.05)	226.5(8.04)	2274.0(80.74)	3.6(0.13)	1.0(0.04)	105457.3
	2013—2017	781.3(21.21)	137.8(3.74)	2756.5(74.85)	5.2(0.14)	2.1(0.06)	103682.1
	2001-2017	1015.2(13.01)	471.2(6.04)	6255.4(80.19)	48.2(0.62)	10.3(0.13)	102906.0

表1 土地覆被转移矩阵/(10⁴hm²;%) Table 1 Transfer matrix of Land cover

2.2 土地覆被变化的时空动态概率分析

运用土地覆被变化时空动态概率模型对 2001—2005、2005—2009、2009—2013 和 2013—2017 年 4 个时 段的土地覆被类型的动态转换概率进行计算分析表明(表 2):除建设用地外,其他土地覆被类型在所有时期 均存在潜在转换的可能性。其中,草地的潜在转换面积最大,其次是林地和耕地。在 2001—2005 年间,未发 生变更的水域和湿地存在较大的 STDP 值,表明其在空间分布上的不稳定性较强;未利用地虽然转出面积较 大,但是未发生转换的区域的 STDP 值较小,表明其在空间分布上的稳定性好。2005—2013 时段与 2001— 2005 年时段,耕地及水域和湿地的 STDP 值呈减少趋势,而未利用地的 STDP 值则有所增加,表明未利用地的 潜在稳定性逐渐降低;在 2013—2017 年间,林地、草地及耕地的 STDP 值呈减少状态,而未利用地及水域和湿 地的 STDP 值呈增加趋势,但是各个地类的潜在变更面积都有明显增加,表明各个地类的不稳定范围在逐渐 扩张。





Fig.3 Dynamic degree of land cover change in the New Eurasian Continental Bridge Economic Corridor (NECBEC) area 图中的横坐标表示新亚欧大陆桥区域的国家编号(其中,1-28 代表的国家编号与图 1 相同,29 代表整个研究区); 左图例:代表左 纵坐标表示的土地覆被动态度; 右图例:代表左纵坐标表示的土地覆被动态度

2.3 社会经济发展水平与时空集聚性

通过联合国粮食及农业组织(http://www.fao.org)及世界银行集团(https://data.worldbank.org)收集研究 区各个国家 17 年的社会经济指标数据:GDP、农村人口(占总人口比)、城镇人口(占总人口比)、交通(铁路公

里数)、婴幼儿死亡率(每千例活产儿)、服务业就业人员(占就业总数的百分比)、农业增加值(占 GDP 的百 分比)、工业增加值(占 GDP 的百分比)、预期寿命(岁)及 GDP 单位能源使用量(购买力平价美元/千克石油 当量),对其降维分析并计算综合得分的基础上,进行局部 Moran's I 分析,结果表明(图 4):自 2001 年以来, 新亚欧大陆桥社会经济发展的全局 Moran's I 呈现先增后减趋势,说明经济发展水平空间集聚性呈现先增大 后减小趋势,经济发展综合得分较高的区域不断扩大。虽然各个国家经济发展水平有明显的时空分异性,但 是出现高高聚集和低低聚集区域无明显变化,分别分布在西欧(瑞士、德国、荷兰、法国及奥地利等)和中亚北 部(乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯塔及土库曼斯坦等)。此外,2001—2017 年,土库曼斯坦、中国、阿塞拜疆及罗 马尼亚经济发展水平增幅最大,尤其是以石油和天然气(储量世界第四)为支柱产业的土库曼斯坦在 2017 年 被归类为高低聚集区,这可能与其引进外资提高自然资源开发能力,不断拓宽能源输出通道有很大关系,而乌 克兰、俄罗斯、伊朗及白俄罗斯经济水平有轻度降低趋势。

Table 2 Spatiotemporal dynamic probability of land cover change											
	水域利	湿地	林地		草地		耕	地	未利用地		
时间段	Water area a	and wetland	For	est	Grass	land	Cultivat	ed land	Unutiliz	ed land	
Periods	面积 Area	STDP	面积 Area	STDP	面积 Area	STDP	面积 Area	STDP	面积 Area	STDP	
2001—2005	179.82	0.14	1916.20	0.10	2803.04	0.106	390.26	0.10	245.39	0.04	
	1.07	0.20	2.81	0.15	5.82	0.159	0.41	0.14	2.03	0.07	
	0.79	0.27	8.40	0.21	14.85	0.212	3.68	0.21	1.55	0.09	
合计面积 Total area	181	.68	1927	.42	2823	5.71	394	.34	2823	3.71	
2005—2009	230.51	0.12	1723.46	0.10	2546.42	0.11	437.34	0.09	198.98	0.05	
	2.84	0.18	0.92	0.16	2.62	0.17	0.16	0.14	2.13	0.07	
	1.00	0.24	8.84	0.21	13.74	0.22	2.86	0.19	1.19	0.10	
合计面积 Total area	234	.38	1733	.21	2562	2562.78 440.36		.36	202	.29	
2009—2013	265.27	0.12	1543.55	0.10	3217.59	0.11	547.54	0.09	213.29	0.05	
	3.36	0.18	1.09	0.16	3.05	0.17	1.25	0.14	1.45	0.08	
	1.36	0.24	8.89	0.21	13.72	0.22	9.32	0.19	0.79	0.09	
合计面积 Total area	277	.32	1553.53		3234.35		558.11		215.53		
2013—2017	473.89	0.15	4560.28	0.10	7336.49	0.10	956.84	0.08	884.55	0.05	
	5.55	0.23	4.82	0.15	11.22	0.15	0.76	0.12	10.10	0.08	
	3.30	0.30	29.49	0.19	43.04	0.20	10.70	0.16	4.34	0.10	
合计面积 Total area	482	.73	4594	.59	7412	2.22	968	.29	898	.98	

表 2	土地覆盖变化的时空动态概率/(10 ⁴ hm ²)	

表中的 STDP 是时空动态概率的英文缩写(STDP is the abbreviation of Spatiotemporal Dynamic Probability in this table)

2.4 土地覆被变化驱动力的定量分析

随着人类技术水平的进步,人们对于自然环境的改造和适应能力显著增强,各种社会经济发展因素对于 土地覆被驱动效应逐渐增加。为了定量分析各类社会经济驱动因子对土地覆被变化的贡献系数,分别选择 GDP(x1)、城镇人口(x2)、铁路公里数(x3)、人口密度(x4)、服务业就业人员(x5)、农业增加值(x6)、工业增 加值(x7)和 GDP 单位能源使用量(x8)等社会经济指标参数进行 K-Means 聚类分析,应用地理探测器定量分 析它们对土地覆被变化的作用强度(表3)。结果表明:21 世纪以来,人口密度、服务业就业人员及 GDP 单位 能源使用量对耕地的影响整体呈明显上升趋势,GDP、城镇人口和工业增加值的影响则整体呈减弱趋势,农业 增加值的驱动影响整体高于其他因素。GDP 和交通对建设用地增加的驱动作用呈显著增加趋势,而城镇人 口增长对建设用地增长的驱动影响则呈降低趋势。人口密度、农业发展、工业水平、服务业及交通发展对于林 地的驱动影响整体呈上升趋势。其中,人口密度对林地变化影响高于其他因素的影响;GDP 单位能源使用量 对草地变化的影响整体上高于其他因素的影响;GDP、城镇人口、人口密度、交通及服务业增长对水域和湿地 及未利用地的影响整体呈增加趋势,而且 2013—2017 年期间的影响要高于其他时段的影响。



社会经济发展综合得分 Synthesis score of socio-economic development

图 4 NECBEC 沿线国家的社会经济综合发展水平

|--|

Fable 3	Strength	change	of differ	ent socioe	conomic	factors t	o land	l cover	change	during	different	perio	ds
		<u> </u>											

土地覆被类型 Land cover type	时间段 Period	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
水域和湿地	2001—2005	0.01	0.06	0.04	0.10	0.11	0.16	0.15	0.20
Water area and wetland	2005—2009	0.01	0.08	0.02	0.06	0.07	0.20	0.18	0.10
	2009—2013	0.06	0.05	0.05	0.09	0.15	0.11	0.16	0.14
	2013—2017	0.06	0.15	0.05	0.21	0.17	0.14	0.07	0.15
林地 Forest	2001—2005	0.04	0.26	0.02	0.29	0.11	0.20	0.15	0.30
	2005—2009	0.05	0.18	0.05	0.38	0.45	0.37	0.15	0.04
	2009—2013	0.13	0.92	0.04	0.93	0.23	0.04	0.14	0.04
	2013—2017	0.04	0.05	0.03	0.36	0.17	0.27	0.26	0.20
草地 Grassland	2001—2005	0.09	0.28	0.06	0.02	0.07	0.08	0.24	0.23
	2005—2009	0.01	0.19	0.02	0.01	0.12	0.14	0.21	0.39
	2009—2013	0.49	0.11	0.50	0.08	0.16	0.11	0.10	0.09
	2013—2017	0.06	0.14	0.06	0.03	0.08	0.05	0.26	0.27
耕地 Cultivated land	2001—2005	0.10	0.16	0.07	0.10	0.08	0.49	0.17	0.09
	2005—2009	0.05	0.05	0.04	0.20	0.26	0.24	0.36	0.10

Fig.4 Synthesis score of socio-economic development in the countries of NECBEC area

10			生态	学报					39 卷
续表									
土地覆被类型 Land cover type	时间段 Period	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
	2009—2013	0.08	0.11	0.05	0.15	0.13	0.30	0.23	0.07
	2013—2017	0.07	0.09	0.07	0.16	0.17	0.19	0.08	0.10
建设用地	2001-2005	1.00	0.22	1.00	0.09	0.22	0.09	0.31	0.05
Build-up land	2005—2009	1.00	0.21	1.00	0.09	0.21	0.09	0.30	0.05
	2009—2013	1.00	0.08	1.00	0.08	0.09	0.06	0.48	0.08
	2013—2017	0.99	0.05	1.00	0.08	0.06	0.08	0.09	0.08
未利用地	2001-2005	0.12	0.09	0.03	0.16	0.20	0.13	0.10	0.31
Unutilized land	2005—2009	0.07	0.16	0.07	0.18	0.40	0.19	0.31	0.13
	2009—2013	0.11	0.04	0.05	0.18	0.06	0.18	0.11	0.05
	2013—2017	0.01	0.31	0.02	0.07	0.06	0.11	0.04	0.07

表中 X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8 分别代表 GDP、城镇人口、铁路公里数、人口密度、服务业就业人员、农业增加值、工业增加值和 GDP 单 位能源使用量(In this table, X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7 and X8 represent GDP, urban population, railway kilometers, population density, service workers, agriculture value added, industrial value added and GDP unit energy use

3 讨论

21世纪以来,中国的草地减少、林地增加、建设用地增加、未利用地减少的时空趋势这一结果与现有研究^[27-31]一致。耕地转换趋势总体与已有研究结果一致,但由于时间跨度、数据来源^[32-34]及土地覆被分类体系不同,使得研究结论也存在一定差异。如刘纪元等^[35]基于 Landsat 8 OLI、GF—2 等遥感图像获取的土地覆被分类数据发现 2010—2015 年耕地面积处于减少趋势,而文中基于 500m 的数据及马里兰大学(UMD) 植被分类方案,并根据已有研究^[36-38],将 UMD 分类体系的农田—自然植被混合地类归为耕地,结果发现 2013—2017 年耕地面积处于增长趋势。因此,在利用大尺度数据进行局部区域分析时需要首先进行降尺度处理^[39-41]。运用土地覆被时空动态概率模型和驱动力综合分析模型对新亚欧大陆桥经济走廊的土地覆被空间格局时空变化及驱动力影响的定量分析表明,在 2001—2017 年期间,随着研究区社会经济综合水平发展和亚欧大陆环境变化^[19,42],建设用地的扩张的面积主要来自于耕地,林地和草地之间的相互转换最为明显,水域和湿地以及未利用地及整体呈减少趋势。

自 2001 年以来,中国城镇化的快速发展^[43],以及"西部大开发"和"中原崛起"等一系列政策的实施,使 得建设用地呈快速增长趋势,并占用了一定耕地资源^[44-45]。在亚欧大陆^[46-47]及全球^[48-50]的土地覆盖变化研 究中也有类似结论。西亚各国耕地面积波动较大,则主要受石油争端、领土纷争等国家安全形式的影响^[51]。 中亚地区自 1991 年遭受苏联解体的后,农产品市场由计划经济转为市场经济,并受到国际市场的冲击导致该 地区出现大批弃耕现象^[52-54],但是进入 21 世纪后,随着俄罗斯的国家制度稳定和灌溉农业技术的快速发展, 耕地面积呈现增加趋势。西欧地区凭借发达的陆路和海路交通系统及相对完善的基础设施建设,推动经济快 速发展和城市扩张^[55-56],从而引起该区域耕地面积呈增加趋势,而且适宜的水热条件和机械化农场式的生产 模式提高了耕地的开发利用程度^[57]。近年来,东欧地区凭借相对廉价的劳动力、比较宽松的生产环境,成为 西欧制造业转型升级的主要承接国,在制造业的带动下经济踏上了发展快车道,城市扩张也随之而来^[58]。同 时,拥有广袤的大草原的东欧地区,草地与耕地之间出现明显的相互转换趋势,即耕地的增加主要来源于草地 的减少。西伯利亚平原及广大远东地区多为高原和山地,土地贫瘠^[59],耕作条件差,耕地开发程度低^[60],使 得耕地面积呈减少趋势。关于林地、草地和未利用地的变化趋势研究结果,Song(2018)等通过绘制 1982— 2016 年全球土地覆被图集,发现亚洲的裸地面积约减少了 11600 万 hm²。Chen(2019)等发现,自 2001 年以 来,全球三分之一的植被区呈变绿趋势,绿叶面积增加了 5%,相当于一个亚马逊热带雨林,其中中国至少贡 献 25%,而全球 5%的土地也正在荒漠化^[61]。 新亚欧大陆桥区域不同的土地覆被类型的主要驱动因子在不同时段呈现不同差异,但整体上随着社会经济的发展,人类活动对土地覆被变化的干扰程度呈增加趋势^[17,25]。尤其是进入 21 世纪以来,建设用地和耕地受人类活动的干扰程度日益增大,而林地、草地、水域和湿地,以及未利用地等土地覆被类型的变化则主要受自然气候变化的影响。文中土地覆被时空动态概率模型的模拟结果也与上述结果一直。在未来研究过程中,进一步提高土地覆被数据的分辨率和精度,综合考虑自然因素与人文因素的耦合驱动作用,将更加有效地揭示和阐述土地覆盖变化的驱动机理。

4 结论

新亚欧大陆桥土地覆被类型面积的大小顺序依次为草地、未利用地、林地、耕地、水域和湿地、建设用地。 其中,草地面积为整个区域面积的44.53%,而建设用地的比例则不足5%。在2001—2017年间,草地、耕地及 建设用地面积分别增加11457万hm²、841万hm²及396万hm²,而林地、未利用地及水域和湿地面积分别减少 7409万hm²、4659万hm²及626万hm²。

2001—2013年与2013—2017年两个时段相比,后一时段的耕地、林地、建设用地、未利用地及水域和湿地的年变化幅度整体上均大于前一时段。自2013年以后,草地、水域和湿地,以及未利用地的潜在稳定性总体呈减少趋势,而林地和耕地的潜在稳定性则呈增加趋势。新亚欧大陆桥沿线各个国家的社会经济发展综合水平存在较强的集聚性,而且这种集聚性总体呈在那个家趋势。以上表明,随着"一带一路"倡议的启动和规划实施,在新亚欧大陆桥沿线各国的社会经济快速发展过程中,土地覆被资源的开发利用主要趋向于草地和未利用地等土地覆被类型,从而引起这两种土地覆被类型呈现减少趋势,而对于现有的耕地和林地则处于保护开发状态,这也体现了"一带一路"倡议发展规划中需要强调的在推动"一带一路"沿线各国的社会经济快速发展的同时,也要加强生态环境保护的可持续发展战略思想。

参考文献(References):

- [1] Lawler J J, Lewis D J, Nelson E, Plantinga A J, Polasky S, Withey J C, Helmers D P, Martinuzzi S, Pennington D, Radeloff V C. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(20): 7492-7497.
- [2] Turner II B L, Lambin E F, Reenberg A. 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, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [3] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. Science, 2005, 309(5734): 570-574.
- [4] 陈佑启,杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展. 经济地理, 2001, 21(1): 95-100.
- [5] Alkama R, Cescatti A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. Science, 2016, 351(6273): 600-604.
- [6] Turner II B L, Skole D, Sanderson S, Fischer G, Fresco L, Leemans R. Land-use and land-cover change: Science/research plan. IGBP report 35.
 Stockholm: Royal Swedish Academy of Sciences, 1995.
- [7] 郝慧梅, 郝永利, 任志远. 近 20 年关中地区土地利用/覆盖变化动态与格局. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4525-4536.
- [8] 麦尔耶姆・亚森, 买买提・沙吾提, 吐尔逊・艾山, 如则麦麦提・米吉提, 依克丽曼・阿布都米提, 马依拉・热合曼. 新疆渭干河—库 车河三角洲绿洲耕地时空变化特征分析. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3506-3518.
- [9] 张莉,吴文斌,宋茜,纵兆伟,胡琼,陈迪,项铭涛,陆苗. 2000—2010 年非洲耕地利用格局变化及其生态环境背景分析.中国农业科学,2018,51(6):1144-1155.
- [10] 范泽孟, 岳天祥, 刘纪远, 马胜男. 中国土地覆盖时空变化未来情景分析. 地理学报, 2005, 60(6): 941-952.
- [11] Yue T X, Fan Z M, Liu J Y. Scenarios of land cover in China. Global and Planetary Change, 2007, 55(4): 317-342.
- [12] 李婧, 范泽孟, 岳天祥. 中国西南地区土地覆盖情景的时空模拟. 生态学报, 2014, 34(12): 3266-3275.
- [13] Fan Z M, Li J, Yue T X, Zhou X, Lan A J. Scenarios of land cover in Karst area of southwestern China. Environmental Earth Sciences, 2015, 74 (8): 6407-6420.
- [14] Fan Z M, Li J, Yue T X. Land-cover changes of biome transition zones in Loess Plateau of China. Ecological Modelling, 2013, 252: 129-140.

- [15] Lambin E F, Turner B L, Geist H J, Agbola S B, Angelsen A, Bruce J W, Coomes O T, Dirzo R, Fischer G, Folke C, George P S, Homewood K, Imbernon J, Leemans R, Li X B, Moran E F, Mortimore M, Ramakrishnan P S, Richards J F, Skånes H, Steffen W, Stone G D, Svedin U, Veldkamp T A, Vogel C, Xu J C. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. Global Environmental Change, 2001, 11(4): 261-269.
- [16] 马晴,李丁,廖杰,韩杰. 疏勒河中下游绿洲土地利用变化及其驱动力分析. 经济地理, 2014, 34(1): 148-155.
- [17] 刘纪远,张增祥,徐新良,匡文慧,周万村,张树文,李仁东,颜长珍,于东升,吴世新,江南.21世纪初中国土地利用变化的空间格局 与驱动力分析.地理学报,2009,64(12):1411-1420.
- [18] 刘卫东, 宋周莺, 刘志高, 叶尔肯·吾扎提, 宋涛, 牛方曲, 韩梦瑶. "一带一路"建设研究进展. 地理学报, 2018, 73(4): 620-636.
- [19] 刘卫东."一带一路"战略的科学内涵与科学问题. 地理科学进展, 2015, 34(5): 538-544.
- [20] 吴绍洪,刘路路,刘燕华,高江波,戴尔阜,冯爱青."一带一路"陆域地理格局与环境变化风险.地理学报,2018,73(7):1214-1225.
- [21] 孙峻岭,林炳耀. 新亚欧大陆桥经济新发展及对徐州影响. 经济地理, 2011, 31(11): 1793-1797.
- [22] 孙峻岭,林炳耀,孙琳琳.新亚欧大陆桥东端城市群空间结构规划构想. 地理研究, 2012, 31(5): 931-944.
- [23] 范泽孟,李婧,岳天祥.黄土高原生态系统过渡带土地覆盖的时空变化分析.自然资源学报,2013,28(3):426-436.
- [24] Zeng Z Z, Estes L, Ziegler A D, Chen A P, Searchinger T, Hua F Y, Guan K Y, Jintrawet A, Wood E F. Highland cropland expansion and forest loss in Southeast Asia in the twenty-first century. Nature Geoscience, 2018, 11(8): 556-562.
- [25] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [26] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.
- [27] 李佳洺, 陆大道, 徐成东, 李扬, 陈明星. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化. 地理学报, 2017, 72(1): 148-160.
- [28] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东. 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.
- [29] 郑朝菊,曾源,赵玉金,高文文,赵旦,吴炳方. 20世纪90年代以来中国西南地区土地覆被变化. 生态学报, 2016, 36(23): 7858-7869.
- [30] 胡琼,吴文斌,项铭涛,陈迪,龙禹桥,宋茜,刘逸竹,陆苗,余强毅.全球耕地利用格局时空变化分析.中国农业科学,2018,51(6): 1091-1105.
- [31] 董金玮, 匡文慧, 刘纪远. 遥感大数据支持下的全球土地覆盖连续动态监测. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(2): 259-260.
- [32] 王震, 闫文德, 刘曙光, 高超, 谌小勇. 基于 MODIS 数据的中国三种主要土地类型变化的空间特征分析. 生态学报, 2017, 37(10): 3295-3301.
- [33] 白燕, 冯敏. 全球尺度多源土地覆被数据融合与评价研究. 地理学报, 2018, 73(11): 2223-2235.
- [34] 何凡能,李士成,杨帆,李美娇.全球历史土地利用数据集中国草地数据可靠性评估.中国科学:地球科学,2019,49(2):421-433.
- [35] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 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.
- [36] 董思言, 延晓冬, 熊喆, 石英, 王娟怀. 土地利用/覆盖变化对中国不同季节气温的影响. 生态学报, 2015, 35(14): 4871-4879.
- [37] 张磊,吴炳方,李晓松,邢强.基于碳收支的中国土地覆被分类系统.生态学报, 2014, 34(24): 7158-7166.
- [38] 范泽孟,岳天祥,田永中.中国 Holdridge 生命地带平均中心的时空分布及其偏移趋势.生态学报, 2004, (07): 1380-1387.
- [39] Yue T X, Zhao N, Fan Z M, Li J, Chen C F, Lu Y M, Wang C L, Xu B, Wilson J. CMIP5 downscaling and its uncertainty in China. Global and Planetary Change, 2016, 146: 30-37.
- [40] Li X C, Yu L, Sohl T, Clinton N, Li W Y, Zhu Z L, Liu X P, Gong P. A cellular automata downscaling based 1 km global land use datasets (2010-2100). Science Bulletin, 2016, 61(21): 1651-1661.
- [41] 全金玲, 占文凤, 陈云浩, 刘闻雨. 遥感地表温度降尺度方法比较——性能对比及适应性评价. 遥感学报, 2013, 17(2): 374-387, 361-373.
- [42] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, Potapov P V, Tyukavina A, Vermote E F, Townshend J R. Global land change from 1982 to 2016. Nature, 2018, 560(7720): 639-643.
- [43] 孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟. 中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例. 生态学报, 2012, 32(20): 6440-6451.
- [44] Du S Q, Shi P J, Van Rompaey A. The relationship between urban sprawl and farmland displacement in the Pearl River Delta, China. Land, 2014, 3(1): 34-51.
- [45] Wang L, Li C C, Ying Q, Cheng X, Wang X Y, Li X Y, Hu L Y, Liang L, Yu L, Huang H B, Gong P. China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(22): 2802-2812.
- [46] 陈迪,吴文斌,周清波,胡琼,项铭涛,陆苗,余强毅.亚洲耕地利用格局十年变化特征研究.中国农业科学,2018,51(6):1106-1120.
- [47] 项铭涛,吴文斌,胡琼,陈迪,陆苗,余强毅. 2000—2010 年欧洲耕地时空格局变化分析.中国农业科学, 2018, 51(6): 1121-1133.

- [48] 陈军,陈利军,李然,廖安平,彭舒,鲁楠,张宇硕.基于 GlobeLand30 的全球城乡建设用地空间分布与变化统计分析.测绘学报,2015, 44(11):1181-1188.
- [49] Angel S, Parent J, Civco D L, Blei A, Potere D. The dimensions of global urban expansion: estimates and projections for all countries, 2000-2050. Progress in Planning, 2011, 75(2): 53-107.
- [50] Schneider A, Friedl M A, Potere D. A new map of global urban extent from MODIS satellite data. Environmental Research Letters, 2009, 4 (4): 044003.
- [51] 杨建荣, 孙京盟. 阿拉伯国家粮食安全问题探究. 西亚非洲, 2009, (11): 33-40.
- [52] Baumann M, Kuemmerle T, Elbakidze M, Ozdogan M, Radeloff V C, Keuler N S, Prishchepov A V, Kruhlov I, Hostert P. Patterns and drivers of post-socialist farmland abandonment in Western Ukraine. Land Use Policy, 2011, 28(3): 552-562.
- [53] Kuemmerle T, Hostert P, Radeloff V C, van der Linden S, Perzanowski K, Kruhlov I. Cross-border comparison of post-socialist farmland abandonment in the Carpathians. Ecosystems, 2008, 11(4): 614.
- [54] Kuemmerle T, Olofsson P, Chaskovskyy O, Baumann M, Ostapowicz K, Woodcock C E, Houghton R A, Hostert P, Keeton W S, Radeloff V C. Post - soviet farmland abandonment, forest recovery, and carbon sequestration in western Ukraine. Global Change Biology, 2011, 17(3): 1335-1349.
- [55] Aleta A, Meloni S, Moreno Y. A multilayer perspective for the analysis of urban transportation systems. Scientific Reports, 2017, 7: 44359.
- [56] Taubenböck H, Esch T, Felbier A, Wiesner M, Roth A, Dech S. Monitoring urbanization in mega cities from space. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 162-176.
- [57] Livesey K A, Butters L. The evolution of mechanised farming in the west Lancashire region of the united kingdom since 1945. Scientific Papers-Series A, Agronomy, 2013, 56: 444-450.
- [58] 于军. 中国—中东欧国家合作机制现状与完善路径. 国际问题研究, 2015, (2): 112-126.
- [59] Kovda I, Goryachkin S, Lebedeva M, Chizhikova N, Kulikov A, Badmaev N. Vertic soils and Vertisols in cryogenic environments of southern Siberia, Russia. Geoderma, 2017, 288: 184-195.
- [60] 张宇硕, 陈军, 陈利军, 李然, 张委伟, 鲁楠, 刘吉羽. 2000-2010 年西伯利亚地表覆盖变化特征——基于 GlobeLand30 的分析. 地理科学 进展, 2015, 34(10): 1324-1333.
- [61] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature sustainability, 2019, 2(2): 122-129.

13