

DOI: 10.5846/stxb202011192977

张林林, 梁传壮, 马海云, 陈鑫, 蔡江涛, 郭仁杰, 陈铁喜. 土地管理对植被变绿的潜在贡献——以中国东北农业区为例. 生态学报, 2022, 42(2): 720-731.

Zhang L L, Liang C Z, Ma H Y, Chen X, Cai J T, Guo R J, Chen T X. The potential contribution of land managements to vegetation greening: a case study of the northeast agricultural region in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 720-731.

土地管理对植被变绿的潜在贡献 ——以中国东北农业区为例

张林林¹, 梁传壮¹, 马海云¹, 陈鑫¹, 蔡江涛¹, 郭仁杰¹, 陈铁喜^{1,2,*}

¹ 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044

² 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘要: 植被变绿现象一般指绿度指标统计上呈现年际增加趋势。大尺度植被变绿现象及其归因与影响研究广泛开展中。其中, 量化各种驱动因素的贡献仍然十分困难, 特别是土地管理影响的研究尚显不足。选择了中国农业分布最广泛的东北农业区, 尝试从植被变绿的年际变化和季节特征对土地管理因素的潜在贡献进行了推断分析, 并选择增强植被指数 EVI 作为指标。在 2000—2019 年期间, EVI 在农田和自然植被(林地和草地)的变化趋势分别为 $2.19 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) 和 $1.86 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) ($1.83 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) 和 $1.94 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$)), 即处于相同量级。但是, 农田 EVI 的增长主要集中在 6—9 月, 增长率为 $4.99 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$), 而同期自然植被的增长速率仅为 $2.30 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) (林地和草地分别为 $1.79 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) 和 $3.71 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$)), 气候驱动因素很难解释这种季节性的不对称变化。土地管理选取种植类型变迁、农药与化肥施用量以及农业机械化等指标, 结果表明该地区农田的土地管理强度变化较大(数据范围 2000—2018 年)。其中, 小麦种植面积呈现下降(-85.61%), 同期玉米和水稻种植面积显著扩张, 增长率分别为 144.64% 和 90.68%。化肥和农药施用量分别增加了 112.61% 和 80.24%, 农业机械总功率与大中型拖拉机数量增长量分别为 185.04% 和 1192.30%。这些农田土地管理活动对农作物生长起到显著促进作用, 能够较好解释农田植被在 6—9 月份相比自然植被具有更高的变绿速度。为了进一步量化相关机制, 模式需要优化土地管理过程, 完善其对变绿贡献的模拟。

关键词: 变绿; 农田; 气候变化; 土地管理

The potential contribution of land managements to vegetation greening: a case study of the northeast agricultural region in China

ZHANG Linlin¹, LIANG Chuazhuang¹, MA Haiyun¹, CHEN Xin¹, CAI Jiangtao¹, GUO Renjie¹, CHEN Tiexi^{1,2,*}

¹ School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

² Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: The vegetation greening phenomenon usually refers to a statistical increase in annual vegetation greenness index. Researches on large-scale vegetation greening phenomenon, corresponding driving factors and their influence have been widely found. It is still difficult to quantify the contribution of the drivers, especially the research on the impact of land management is still insufficient. In this paper, the northeast agricultural region, which has the most extensive agricultural distribution in China, was selected to analyze the potential contribution of land management to greening through the inter-

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0504000); 国家自然科学基金项目(31570464)

收稿日期: 2020-11-19; 网络出版日期: 2021-07-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: txchen@nuist.edu.cn

annual variation and seasonal characteristics of vegetation changes and Enhanced Vegetation Index (EVI) was applied to indicate vegetation condition. During 2000—2019, the interannual trends of EVI over croplands and natural vegetation (forest and grassland) were $2.19 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) and $1.86 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) ($1.83 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) and $1.94 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$), respectively, that is, at the same magnitude. However, the growth of cropland EVI was mainly concentrated in June to September, with a growth rate of $4.99 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$), while the growth rate of natural vegetation was only $2.30 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) (forest and grassland were $1.79 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$) and $3.71 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$), respectively) at the same time. Climate driving factors are difficult to explain the seasonal asymmetric growth alone. The land management here mainly contains the change of planting type, the use of pesticides and chemical fertilizers and agricultural mechanization. Results demonstrate that the intensity of land management of croplands in this area has changed greatly during 2000—2018. The sowing area of wheat decreases (-85.61%), and that of corn and rice increased significantly by 144.64% and 90.68% , respectively. During the same period, the use of chemical fertilizer and pesticide increased by 112.61% and 80.24% , respectively. The total power of agricultural machinery and the number of large and medium-sized tractors increased by 185.04% and 1192.30% respectively. These land management activities have played a significant role in promoting the growth of crops, which can better explain the higher rate of greening of cropland vegetation compared with natural vegetation during June to September. It is suggested that to further clarify this mechanism, models need to optimize the land management process, and improve the simulation of land management contribution to greening.

Key Words: greening; cropland; climate change; land management

植被在大尺度上的变化及其驱动因素是当前研究的热点问题。近些年有关全球变绿现象分析、机制研究以及其影响,受到广泛的关注。变绿现象一般指在年际尺度上的植被绿度等生态指标增加趋势^[1]。在研究中比较常用的方法是分析遥感的植被指数的年际变化趋势^[2-5]。常用指数包括叶面积指数(LAI)、归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI)等。

为了解植被变绿的机理和驱动因素,至今已经开展许多研究,这主要涉及 CO_2 的施肥效应^[6-8], 气候变化^[9-12], 土地利用和土地覆盖变化(LUCC)^[13-15] 和氮沉降作用等^[16-19]。研究变绿方法主要包括统计方法和模型模拟^[3,20-21]。统计方法的优点是基于观测数据,而缺点则是在量化归因方面比较困难,难以分析各驱动要素的贡献。而模型在量化各驱动要素的贡献方面具有独特的优势,可以通过控制变量与设定不同情景进行模拟,从而使其结果归因较为合理^[22]。但同时模型也存在着不足,主要是模式对于一些重要过程尚没有很好地进行描述,从而对于这类缺乏或是不完善的过程无法进行完全的表达,这一点在土地管理方面尤为突出。土地管理一般指在同一种土地利用类型下的管理活动,例如包括农业种植制度(单季种植或者复种)、作物类型、灌溉设施与农药、化肥的使用、林地的间伐与管理等^[23]。土地管理的数据自身完备性较差,是造成模型中对这一过程表达相对较为欠缺的主要原因^[24-27]。

遥感植被指数表明,中国地区整体上呈现了显著的变绿趋势^[2],其驱动机制尚需进一步明晰。其中对变绿具有潜在贡献的土地利用变化与土地管理作用,主要体现在中国实施的一系列重大生态工程和农业现代化。以三北防护林工程、退耕还林还草工程等为代表的多个生态工程的实施,提升了我国陆地生态系统碳汇能力^[28-30]。同时,基于大气 CO_2 浓度与碳同化模式的研究表明,中国地区陆地生态系统是一个巨大的碳汇^[31]。

与此同时,中国和印度的广大农田区域对全球变绿作出了巨大贡献,这与模型的预期结果存在一定的差异性^[2]。模式结果表明变绿的原因是 CO_2 施肥效应为主,但 CO_2 施肥效应强度近期出现了相对的减弱^[22,32]。农田更容易受到人类管理活动的影响。为了能够进一步深入研究基于观测的土地管理对植被变化影响的机制,本研究选择了一个典型的农业区,即东北农业地区。该地区变绿趋势明显,有着较为广泛的农田和自然植被分布,同时农田管理强度较大,为研究提供了较好的样本。土地管理活动使得农田植被与自然植被存在较

为明显的物候差异,本研究拟尝试分析农田植被与自然植被变绿的季节特征,从而对土地管理的作用进行推断。

1 数据和方法

1.1 研究区域

基于气候变化和相应的耕作制度,我国可大致分为 9 大农业区^[33-34],数据来源于国家农业科学数据共享中心(<http://region.agridata.cn/>)。本研究选择东北农业区作为研究区,如图 1a 所示,其中数字高程数据采用 GTOPO30 数据(<https://www.usgs.gov/>)。研究区包括了黑龙江,吉林,辽宁省和内蒙古自治区东部的呼伦贝尔市。研究区域是我国重要的林业和商业谷物农业生产基地,总面积约占我国陆地面积的 12.9%。

该研究区的地形主要是平原、丘陵和山脉,农田和自然植被分布广泛(图 1)。这是一个典型的单季种植区,农作物的生长集中在 5 月至 10 月,主要种植水稻、玉米和大豆等。利用基于遥感反演的 LAI 数据表明,该地区在 2000 年至 2017 年期间表现出强烈的变绿现象^[2]。

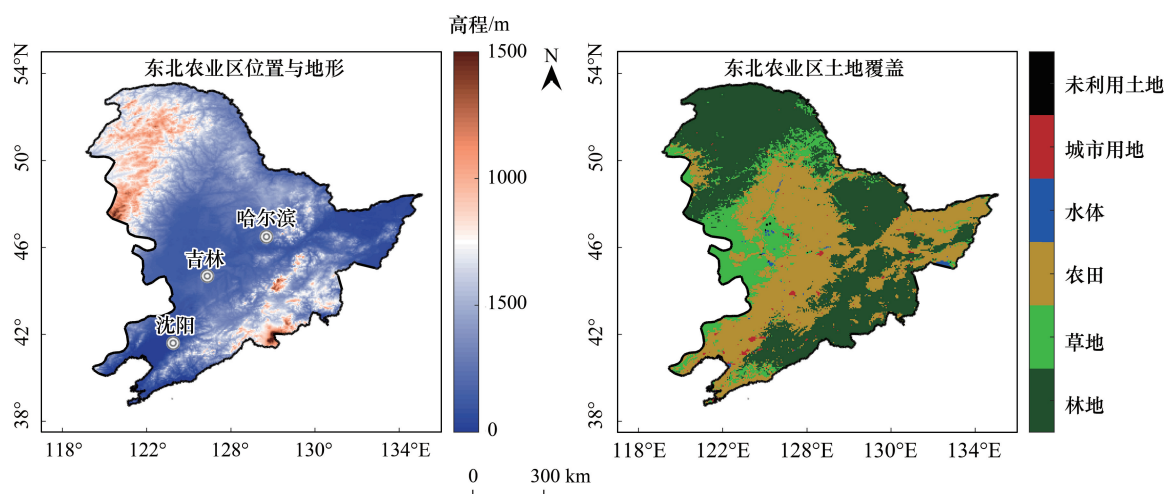


图 1 研究区地形与土地利用情况

Fig.1 Topography and land use of the study area

地形数据使用 GTOPO30 数据的 DEM(数字高程模型);土地覆盖数据采用 MODIS 土地覆盖产品(MCD12Q1,V006)的 2010 年数据(表 1)。

1.2 MODIS 植被指数和土地覆盖数据

遥感植被指数 NDVI 和 LAI 都被广泛应用在长序列植被分析中。NDVI 在长序列研究中具有独特的优势,其数据可溯源至 1981 年^[35]。LAI 是表征植物冠层的具有具体生态意义的指数。然而,由于计算过程复杂,基于遥感的 LAI 产品通常比植被指数具有更大的不确定性,因此物候研究中往往采用植被指数而非 LAI。与使用红波段和近红外波段的 NDVI 相比,增强植被指数 EVI 增加了蓝波段,可以更好地克服植被覆盖度较高的地区 NDVI 的饱和问题^[36]。因此,本文选择 EVI 来指示植被状况。

$$EVI = \frac{G \times (\rho_{NIR} - \rho_{red})}{\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue} + L}$$

其中 ρ_{NIR} , ρ_{red} , ρ_{blue} 分别是近红外,红色和蓝色波段的反射率, $G(2.5)$ 是增益因子, C_1 , C_2 和 L 分别是 6, 7.5, 1。

土地利用是一个动态过程,存在一定的年际波动。东北地区农田自 20 世纪 80 年代至 2000 年左右,呈现了整体的快速增加趋势^[30]。2000—2005 年,耕地轻度增加^[37]。2000—2015 年间,林草地向耕地转化面积大

于耕地向林草地转化面积,更为显著的是旱地向水田转移^[38]。旱田与水田之间的转移并不影响土地作为农田这一类型,可以归为土地管理方式的一种。基于时间序列分析的需要,假设土地利用类型变化不大时,可以选择一个参考年进行分析(会部分引入 LUCC 带来的误差)。因此,本研究选择 2010 年为 2000—2019 年的基本土地覆盖信息。

土地分类体系常见的有国际地圈—生物圈计划(IGBP)分类方案以及我国《土地利用现状分类》,后者由质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会联合发布,有 GB/T21010—2007 和 GB/T21010—2017 两个版本。本研究针对植被覆盖类型,包括农田和自然植被(含林地与草地),并不考虑建设用地、水体和未利用土地等,因此,两类分类体系在本研究中差别不大。同时,相关研究也指出,IGBP 分类体系更适合于生态环境领域^[39]。最后,选择了 MODIS 月度 EVI 产品 MOD13C2 和 2010 年土地利用数据 MCD12C1,两者的空间分辨率均为 0.05°,基于国际地圈—生物圈计划(IGBP)分类方案的 MCD12C1 被重新分为 6 组(表 1)。本研究针对植被地区,包括农田和自然植被(林地与草地)。

表 1 基于 MCD12C1 数据的 IGBP 分类体系的重新分类的土地覆盖类型

Table 1 Land cover types reclassified by IGBP classification based on MCD12C1 data

类型 Class	IGBP 分类名称 Class name of IGBP
林地 Forests	1,常绿针叶林; 2,常绿阔叶林; 3,落叶针叶林; 4,落叶阔叶林; 5,混交林; 6,封闭灌木丛; 7,开放灌木丛; 8,热带稀树草地
草地 Grasslands	9,稀树草地; 10,草地
农田 Croplands	12,农田; 14,农田/自然植被
水体 Water Bodies	17,水体
城市用地 Built-up lands	13,城市和建筑用地
未利用土地 Unused lands	11,永久湿地; 15,永久性冰雪; 16,裸地

1.3 气候数据

这里选择的是中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)的降水和温度数据(国家气象科学数据中心, <http://data.cma.cn>),空间分辨率为 0.5°,其分辨率与 EVI 数据(0.05°)有所不同。在较长时间尺度上(月尺度到年际尺度),气象要素往往具有较好的空间一致性,因此假定同一气候数据网格中的植被处于相同的气候环境中。

1.4 农田土地管理

土地管理的内容非常广泛,一般指同一类土地覆盖类型下的各类管理活动^[23],本文主要关注发生在农业地区的土地管理。主要考虑的因素包括:作物种植类型的演变,农业机械化,农药和化肥的用量。由于该地区仅包括内蒙古自治区的小部分,因此本研究主要从国家统计局在省一级提供的黑龙江,吉林和辽宁三个省中选择统计数据。

1.5 统计方法与分析

使用 Pearson 相关系数和 Mann-Kendall 检验确定相关性和趋势。

本文主要关注植被变化,因此在六个分类系统中,选择植被类型,即包括农田和自然植被(林地和草地)作为研究对象。气候数据和农业数据被用作解释植被变化归因分析,采用一元回归与多元回归方法。由于大气中 CO₂ 浓度逐年单调增长,而该地区农田现代化进程持续,农田管理(包括机械化、农药与化肥使用等)对农作物生长保持了连续的促进作用。常规趋势统计难以对气候变化与农田管理这两类驱动要素的贡献进行区分,因此并未采用偏相关分析等方法。气候变化同时作用于农田与自然植被,农田土地管理却是仅作用于农田植被,理论上可以反映在植被变化的季节特征上。因此,对农田与自然植被 EVI 年际变化的季节特征进行对比分析,从而对土地管理的影响进行推断。

2 结果

2.1 变绿现象分析

首先利用 EVI 指数对研究区变绿现象进行研究,计算了 EVI 的多年变化线性趋势(图 2)。2000 年至 2019 年,该地区主要植被类型呈现明显的变绿趋势,其中农田、自然植被(林地和草地)的年 EVI 变率分别为 $2.19 \times 10^{-3}/a$ 、 $1.86 \times 10^{-3}/a$ (林地和草地分别为 $1.83 \times 10^{-3}/a$ 和 $1.94 \times 10^{-3}/a$)(图 2),可以看出自然植被和农田的变绿速率在同一数量级上,这种现象也体现在 EVI 的空间变化趋势上(图 3),因此该区域的变绿趋势无论在空间上还是区域平均值都是普遍的。

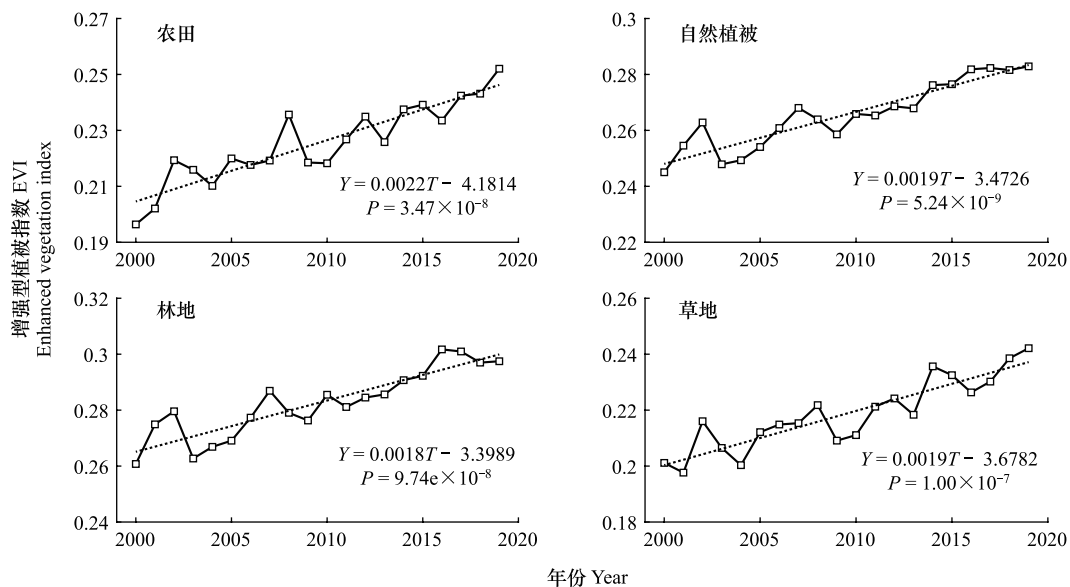


图 2 2000—2019 年区域平均 EVI 年际变化时间序列分析

Fig.2 Time series analysis of the interannual variation of regional average EVI from 2000 to 2019

EVI 包括农田,自然植被,林地,草地;时间范围是 2000—2019 年期间,红线表示线性拟合,T 代表年份

尽管农田在每年的时间序列中都呈现出变绿趋势,但值得注意的是,种植到收获的农作物的生长期比自然植被的生长期短得多。那么在年平均时间序列表现出的同等量级的变化,在季节上会存在较大差异,量化变绿的季节特征非常必要。如图 4 所示,2000—2019 年的多年平均月值,可以看出春季农田 EVI 增加趋势明显小于自然植被。最明显的是,五月份的农田 EVI 没有明显增加(仅为 $0.24 \times 10^{-3}/a$)。相反,五月份的林地和草地 EVI 的增长值分别为 $1.45 \times 10^{-3}/a$ 和 $2.75 \times 10^{-3}/a$ 。

农田和自然植被的年内变化趋势在季节上呈现巨大差异(图 4)。农田植被的生长主要集中在 5—10 月,但由于 5 月是播种期,作物处于萌发与出苗的过程,因此 5 月份农田植被 EVI 很低。EVI 变率最高的是 6 月,达到 $7.80 \times 10^{-3}/a$ 。自然植被每月都会发生变绿现象,并且相对均匀。从林地和草地的角度看,草地的变化较为集中,但与耕地的变绿特征仍有很大差异。如果选择 6 月至 9 月作为核心生长期(除去 5 月播种期和 10 月份的收割期),则农田的变绿速率是 $4.99 \times 10^{-3}/a$,约是自然植被变化的 2 倍(自然植被为 $2.30 \times 10^{-3}/a$,林地和草地为 $1.79 \times 10^{-3}/a$ 和 $3.71 \times 10^{-3}/a$)。

2.2 变绿的驱动要素分析

2.2.1 气候因素

模型研究表明, CO_2 的施肥效应对植被变绿的贡献最大。但是,由于 CO_2 显示出稳定的增长趋势,并且同时作为农田和自然植被的环境背景,因此本文中并未计算 CO_2 浓度与 EVI 变化的相关性。气候变化的要素主

要集中在温度和降水这两个核心变量上。

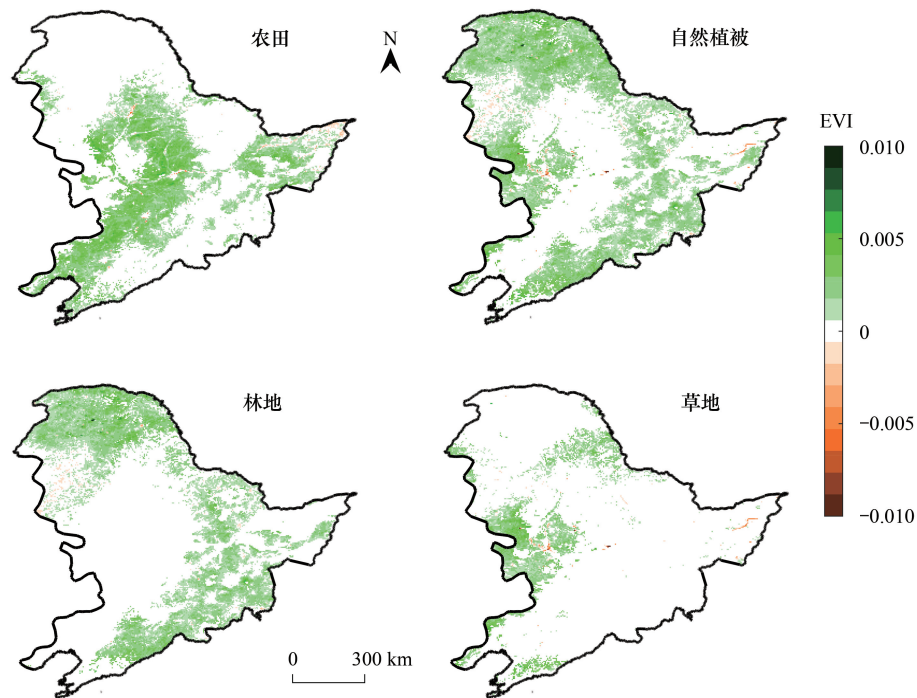


图3 EVI 年际变化的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of EVI interannual variation

EVI 包括农田,自然植被,林地,草地;时间范围是 2000—2019 年期间

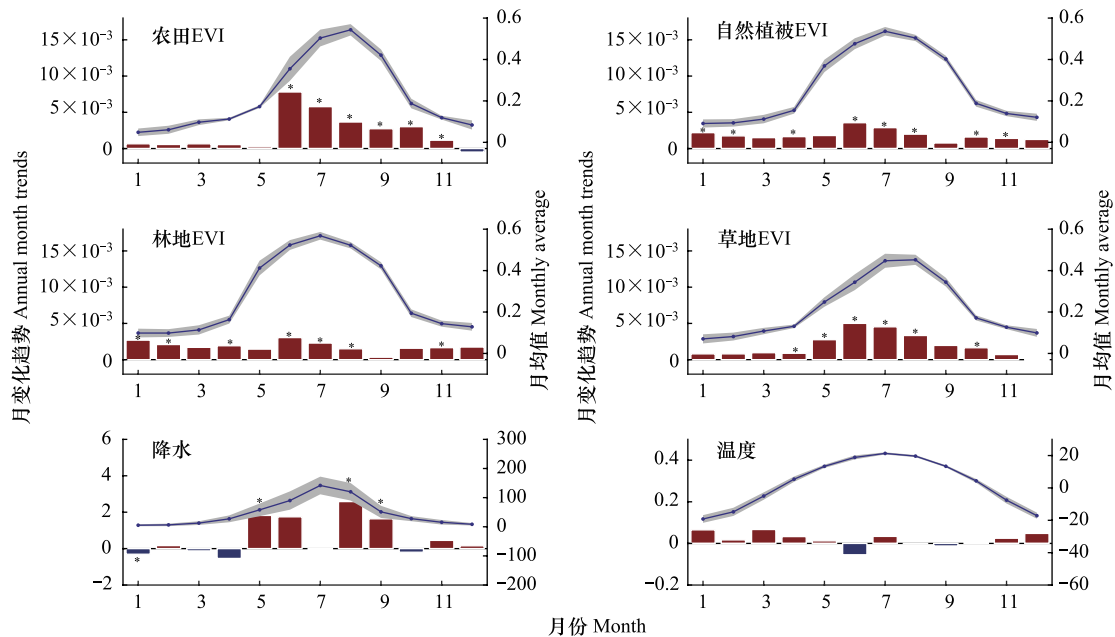


图4 多年平均值的季节特征和各月的年际趋势

Fig.4 Seasonal characteristics and monthly interannual trend of the multi-year average

EVI 在农田、自然植被、林地和草地的月均值与逐月的变化趋势;降水月平均(mm)与年际变率(mm/a);气温月平均(℃)与年际变率(℃/a);蓝色实线表示(轴坐标为右)的 2000 年至 2019 年的多年平均月度值,灰色阴影为标准偏差;柱状图表示各月年际趋势,红色趋势为正,蓝色趋势为负;星号表示显著,即 $P < 0.05$

相关分析表明,降水和温度的关系与植被之间的关系更紧密(表 2)。EVI 与温度和降水量的线性拟合表明,气候变化可以在一定程度解释农田和自然植被的年际变绿现象(图 5,表 3)。整个地区的多年平均温度和降水变化率分别为 0.02 °C /a 和 7.35 mm /a。但是,气温和降水的季节趋势与农田 EVI 的季节趋势有很大不同(图 4)。

表 2 2000—2019 年期间 EVI 与降雨和温度之间的相关关系

Table 2 Correlation between EVI and precipitation (P) and temperature (T) from 2000 to 2019

全年 Annual	农田 Croplands	自然植被 Nature vegetation	林地 Forests	草地 Grasslands
温度 Temperature(T)	0.41	0.32	0.29	0.38
降水 Precipitation(P)	0.54**	0.44	0.42	0.38
降水(5—6 月) Precipitation from May to June (M-J of P)	0.67**	0.66**	0.58**	0.62**
5—10 月 May to October (M-O)	农田	自然植被	林地	草地
温度 T	-0.23	-0.04	-0.01	-0.08
降水 P	0.77**	0.58**	0.51**	0.60**

包括全年平均和 5 月至 10 月 (M-O) 平均的时间序列,以及 5—6 月 (M-J) 累积降水与年 EVI 相关性 (* 表示 ($P<0.1$), ** 表示 ($P<0.05$))

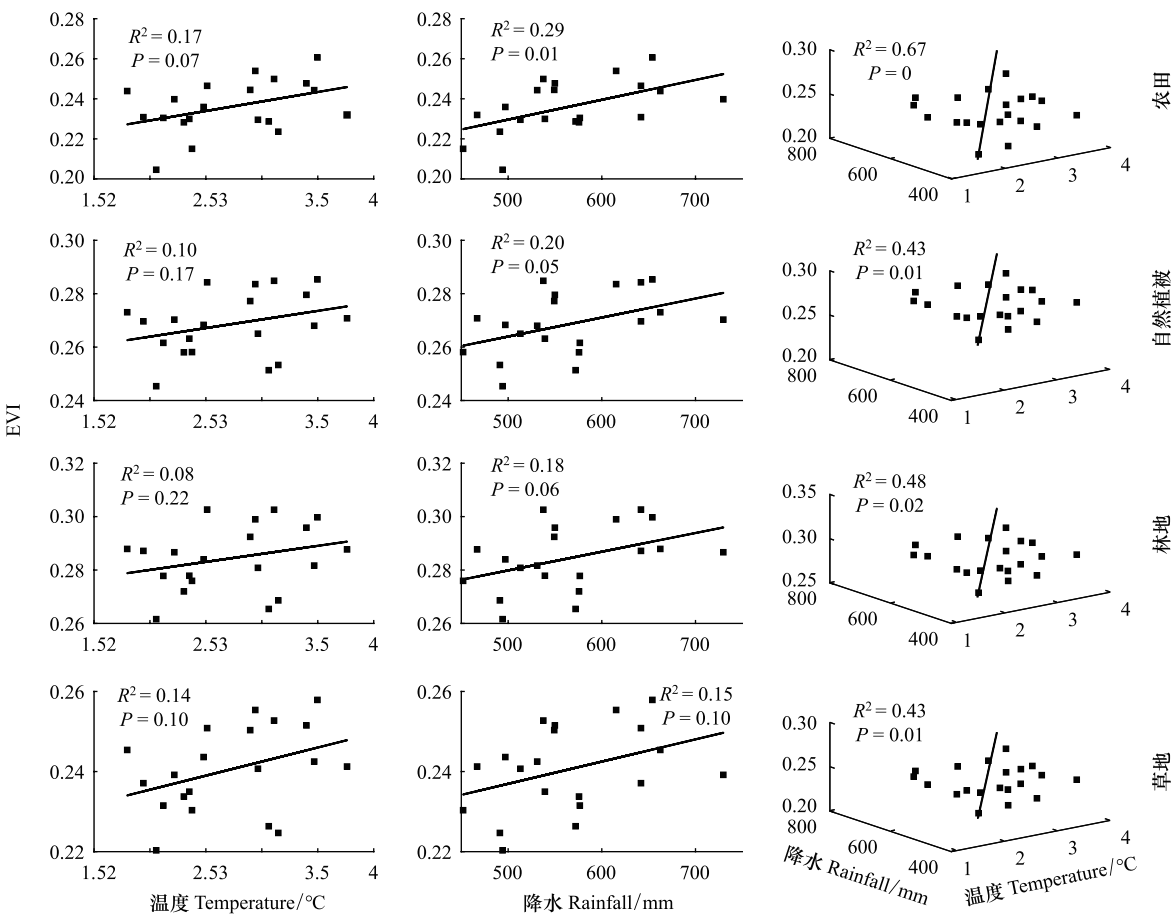


图 5 农田,自然植被,林地和草地与气候因素的拟合

Fig.5 Fitting of cropland, natural vegetation, forest and grassland with climatic factors

行分别是农田,自然植被(包括林地和草地),林地和草地,列是温度,降雨量和所有气候因素(包含温度和降雨);拟合方程(表 3)

2.2.2 土地管理

即使考虑到 CO₂的变化(未展示),它仍然不能解释不同月份农田和自然植被之间的变绿差异,尤其是在 6—9 月期间,农田的变绿趋势远远超过了自然植被(图 4)。出现在农田与自然植被之间的差异很难通过自然环境的变化,包括 CO₂升高和水热条件(温度与降水)来解释。因此,需要进一步从土地管理的角度进行研究。

表 3 年平均 EVI 与温度、降水的拟合方程

Table 3 Fitting equation of annual mean EVI with temperature and precipitation

土地利用类型 Land use class	与温度拟合回归方程 Fit with <i>T</i>	与降水拟合回归方程 Fit with <i>P</i>	与温度、降水拟合回归方程 Fit with <i>T</i> & <i>P</i>
农田 Croplands	$Y = 0.2102 + 0.0095 \times T$	$* Y = 0.1801 + 9.9 \times 10^{-5} \times R$	$* Y = 0.1172 + 0.0151 \times T + 1.37 \times 10^{-4} \times R$
自然植被 Nature vegetation	$Y = 0.2510 + 0.0064 \times T$	$* Y = 0.2284 + 7.1 \times 10^{-5} \times R$	$* Y = 0.1849 + 0.0105 \times T + 9.78 \times 10^{-4} \times R$
林地 Forests	$Y = 0.2680 + 0.0060 \times T$	$Y = 0.2448 + 7.00 \times 10^{-5} \times R$	$* Y = 0.2035 + 0.0099 \times T + 9.53 \times 10^{-4} \times R$
草地 Grasslands	$Y = 0.2214 + 0.0070 \times T$	$* Y = 0.2092 + 5.5 \times 10^{-5} \times R$	$* Y = 0.1660 + 0.0104 \times T + 8.19 \times 10^{-4} \times R$

T 代表温度, *R* 代表降水, * 代表通过 0.05 显著性检验

2000 年研究区的农业种植类型发生了快速变化,如图 6 与表 4 所示,特别是小麦的种植面积显著下降(−85.61%),玉米和水稻的种植面积分别增加了 144.64% 和 90.68%,农业机械化发展迅速。2000—2018 年间,农业机械的总动力增长了 185.04%;大中型农用拖拉机数量增长了 1193.20%。大中型拖拉机配套农具数量增加 760.31%;农药使用量从 8.48×10^4 t 增加到 18.03×10^4 t (到 2018 年),增长 112.61%;农用化肥量增加 80.24%。

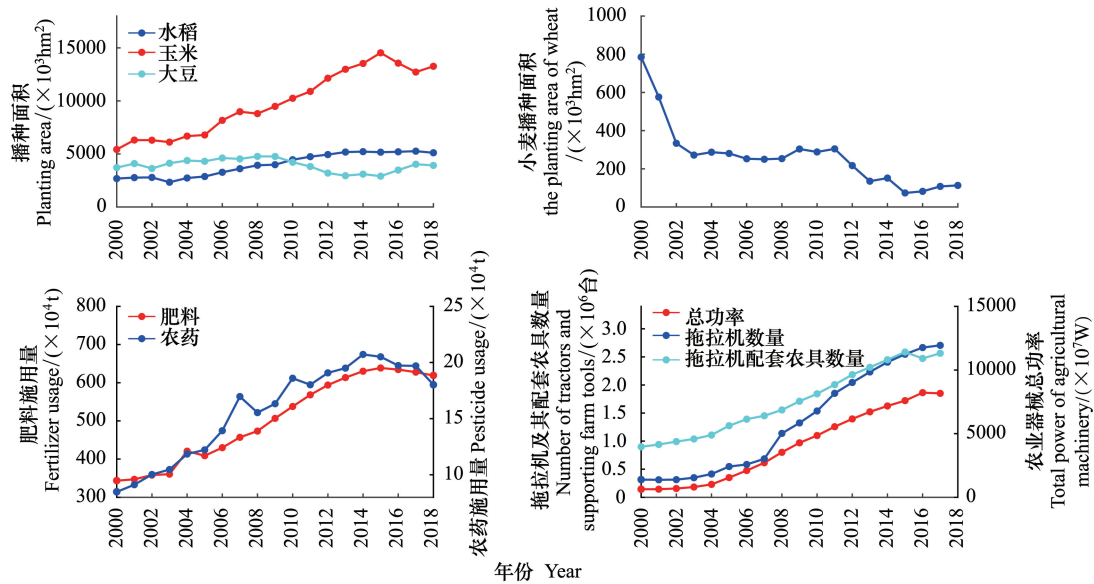


图 6 研究区土地管理相关数据的多年时间序列

Fig.6 Interannual time series of the variables related to the land management in the study area

研究区包括黑龙江,吉林和辽宁省,土地管理数据包括水稻、玉米和大豆的种植面积(hm²);小麦种植面积(hm²);化肥(t)与农药(t)施用量;农业器械总功率(W)、拖拉机数量与拖拉机配套农具数量

从机制上,玉米与水稻田的扩张,特别是玉米,是典型的 C₄ 植物,相比其他作物植株更为高大,同时收获期要比小麦迟很多(小麦一般在夏季收获),理论上如果从小麦向玉米转化,农田植被指数会增加。同时,农业机械化的发展,有利于快速的播种,对于该地区生长期有限,快速的种植能够保证在水热条件适合的情况下尽快完成播种争取到更长的有利生长条件。而化肥的施用量增加,则是更为直接的促进农作物生长。农药的使用,对于农业病虫害防治等有着直接的作用。综合以上三个方面,都会对农田的植被生长产生显著促进影响。

表 4 研究区土地管理相关指标的变化
Table 4 Changes of land management related indicators in study area

种类 Types	2000	2018	变化 Change	变化率 Rates/%	回归方程 Regression equation
水稻 Rice/10 ³ hm ²	2680.4	5111.17	2430.77	90.68	* * Y=184.51×T-3.67e+05
小麦 Wheat/10 ³ hm ²	785.1	113	-672.1	-85.61	* * Y=-24.51×T-3.67e+04
玉米 Maize/10 ³ hm ²	5421.1	13262.27	7841.17	144.64	* * Y=525.28×T-1.05e+06
大豆 Soybean/10 ³ hm ²	3709.2	3920.44	211.24	5.69	* Y=-43.90×T+9.21e+04
农药使用 Pesticide use/10 ⁴ ton	8.48	18.03	9.55	112.61	* * Y=19.25×T-3.82e+04
肥料使用 Fertilizer use /10 ⁴ ton	343.4	618.96	275.56	80.24	* * Y=0.69×T-1.37e+03
农业机械总功率 Total power of agricultural machinery/10 ⁶ W	3969.06	11794.37 (2017)	7344.49	185.04	* * Y=496.95×T-9.91e+05
农业大中型拖拉机数量 Number of large and medium-sized tractors for agriculture	143202	1850600 (2017)	1707398	1192.30	* * Y=1.19e+05×T-2.38e+08
支持农具的大中型拖拉机数量 Number of large and medium-sized tractors supporting farm tools	314501	2705700 (2017)	2391199	760.31	* * Y=1.67e+05×T-3.38e+08

研究区包括黑龙江,吉林和辽宁省;T为年份,* * 代表通过 0.05 显著性检验,* 代表通过 0.1 显著性检验

3 讨论

全球变绿现象、归因以及其带来的影响研究,是当前的重点和热点问题之一。与之相关的论文很多,主要涉及利用统计和模型方法对变绿进行量化和归因分析^[22,40-42]。从统计方法的角度来看,一些约束条件明确的地区取得了很好的结果,例如萨赫勒地区的干旱生态系统(水分约束作用为主)^[21,43],北方林地的生态系统(温度约束作用为主)^[44-45]。与统计方法相比,模型在定量驱动方面具有明显优势,并且可以通过不同情景控制试验来阐明每个元素的贡献率^[46-48]。但是它的缺点也很明显,即当前的模型开发还不成熟,还有一些重要的过程,特别是土地管理部分还有待完善^[49-51]。

这也是本文选择的研究区域所面临的困境,即该区域已经明显变绿,但是从统计学上讲也无法解释农田的变化特征,并且在此过程中土地管理过程未包含在模型中。如果仅从年际变化量看农田变绿速率和自然植被的变绿速率,其变化是相对一致的(图 2—3)。利用温度与降水,并结合大气 CO₂ 的施肥作用,理论上可以解释变绿现象。但是,在主要生长季节(6 月至 9 月),农田的变绿速率比自然植被的变绿速率要快得多,即 EVI 在农田与自然植被的年际变化分别为 4.99×10⁻³/a 和 2.30×10⁻³/a,图 4 所显示的植被变化的季节性差异,利用气候环境变化很难进行解释,需要加入土地管理过程。

该区域仅可进行单作(一年一季种植)。与小麦相比,农民更倾向于种植高产值的玉米和水稻。玉米是典型的 C₄ 植物,是相对小麦等作物更为高大和茂盛的植物。因此,减少小麦播种面积和扩大玉米播种将不可避免地带来 EVI 的变化。农业机械化的发展直接导致播种速度的迅速提高,农作物可以更好地适应农业时代。更重要的是,农业化肥的增加对促进作物生长具有最直接、最显著的作用。因此,这种土地管理(同一土地覆盖类型下)将在理论上和实践上不可避免地促进农田的生长,并将在 EVI 中得到体现。假设气候环境变化引起的 EVI 增量在农田与自然植被是一致的,那么在 6—9 月农田植被 EVI 变率超过自然植被的部分(即 4.99×10⁻³/a 减去 2.30×10⁻³/a)可视为土地管理的影响,土地管理的贡献与气候变化的贡献处于相同量级。

通过变绿的季节特征对土地管理的作用进行推断,其误差可能体现在如下几个方面。首先,农田土地管理影响并没有详细的空间数据作为支撑,因此这一推断依然存在较大不确定性。其次,我国的生态工程会同时体现在 LUCC 与土地管理两个方面,特别是对原有自然植被的保护,以及林地、草地的有序的人工培育,并未改变土地利用类型状况,本研究的假设并不能排除这一要素。最后,为了计算各主要植被类型,采用了 2010 年土地利用分类作为参考值,对分类精度依赖性高,同时也忽略了变化。

4 结论

本研究分析了中国最大农业区——东北农业区植被变绿情况与潜在的驱动要素。采用增强植被指数 EVI 作为指标,研究其年际变化趋势,并做归因分析。农田和自然植被均表现出一致的变绿趋势,其 EVI 的年际变化率处于相同量级,分别为 $2.19 \times 10^{-3}/a$ 和 $1.86 \times 10^{-3}/a$ 。即使不考虑 CO_2 施肥的影响,这种变绿现象似乎也可以用气候变化很好地解释,即降水和温度变化促进了植被的生长。考虑到农作物的生长期相比自然植被要短,那么 EVI 变化趋势在季节性上理论上应该存在较大差异。农作物长势最为旺盛的 6—9 月,农田的 EVI 年际变化率($4.99 \times 10^{-3}/a$)是自然植被($2.30 \times 10^{-3}/a$)的约两倍。同时,农田和自然植被的季节性趋势是不对称的,这一现象难以仅用气候变化来解释。尽管直接从统计数据中建立土地管理的清晰关联较为困难,但快速的农业发展理论上是一个重要的驱动因素。具体而言,本研究区土地管理包括种植类型的变化、农业机械化以及化肥和农药的施用量等,研究期间这些指标都在迅速增长。因此,综上所述表明,除了气候变化之外,土地管理是驱动东北农业区变绿的重要因素之一。如果将自然植被变绿视为气候因子的贡献,6—9 月期间农田变绿的速度比自然植被高出一倍,这表明土地管理的贡献与气候变化的贡献幅度可能相同。

参考文献(References):

- [1] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [2] 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.
- [3] 李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 倪绍祥. 植被叶面积指数遥感监测模型. *生态学报*, 2005, 25(6): 1491-1496.
- [4] 刘家福, 马帅, 李帅, 任春颖, 毛德华, 张柏. 1982-2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2018, 38(21): 7647-7657.
- [5] Zeng Z Z, Piao S L, Li L Z X, Wang T, Ciais P, Lian X, Yang Y T, Mao J F, Shi X Y, Myneni R B. Impact of earth greening on the terrestrial water cycle. *Journal of Climate*, 2018, 31(7): 2633-2650.
- [6] de Jong R, Verbesselt J, Schaepman M E, de Bruin S. Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 642-655.
- [7] Schimel D, Stephens B B, Fisher J B. Effect of increasing CO_2 on the terrestrial carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(2): 436-441.
- [8] Sitch S, Friedlingstein P, Gruber N, Jones S D, Murray-Tortarolo G, Ahlström A, Doney S C, Graven H, Heinze C, Huntingford C, Levis S, Levy P E, Lomas M, Poulter B, Viovy N, Zaehle S, Zeng N, Arneeth A, Bonan G, Bopp L, Canadell J G, Chevallier F, Ciais P, Ellis R, Gloor M, Peylin P, Piao S L, Le Quéré C, Smith B, Zhu Z, Myneni R. Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, 2015, 12(3): 653-679.
- [9] 黄秋婉, 刘志娟, 杨晓光, 白帆, 刘涛, 张镇涛, 孙爽, 赵锦. 东北三省西部春玉米适应气候变化的高产高效灌溉方案分析. *中国农业科学*, 2020, 53(21): 4470-4484.
- [10] 罗新兰, 李英歌, 殷红, 隋明. 东北地区植被 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 412-421.
- [11] Zhang Y Z, Liang S L, Xiao Z Q. Observed vegetation greening and its relationships with cropland changes and climate in China. *Land*, 2020, 9(8): 274.
- [12] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, W. Bjerke J, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, R. Nemani Ramakrishna, B. Myneni R. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2019, 1(1763): 1-14.
- [13] Curtis P G, Slay C M, Harris N L, Tyukavina A, Hansen M C. Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 2018, 361(6407): 1108-1111.
- [14] 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, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 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.
- [15] 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.
- [16] Greaver T L, Clark C M, Compton J E, Vallano D, Talhelm A F, Weaver C P, Band L E, Baron J S, Davidson E A, Tague C L, Felker-Quinn

- E, Lynch J A, Herrick J D, Liu L, Goodale C L, Novak K J, Haeuber R A. Key ecological responses to nitrogen are altered by climate change. *Nature Climate Change*, 2016, 6(9): 836-843.
- [17] 李德军, 莫江明, 方运霆, 彭少麟, Gundersen P. 氮沉降对森林植物的影响. *生态学报*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [18] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, Ellsworth D S, West J B, Tilman D, Knops J M H, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature*, 2006, 440(7086): 922-925.
- [19] Zaehle S, Medlyn B E, De Kauwe M G, Walker A P, Dietze M C, Hickler T, Luo Y Q, Wang Y P, El-Masri B, Thornton P, Jain A, Wang S S, Warlind D, Weng E S, Parton W, Iversen C M, Gallet - Budzynek A, McCarthy H, Finzi A, Hanson P J, Prentice I C, Oren R, Norby R J. Evaluation of 11 terrestrial carbon-nitrogen cycle models against observations from two temperate Free - Air CO₂ Enrichment studies. *New Phytologist*, 2014, 202(3): 803-822.
- [20] Zeng Z Z, Piao S L, Li L Z X, Zhou L M, Philippe C, Wang T, Li Y, Lian X, Wood E F, Friedlingstein P, Mao J F, Estes L D, Myneni R B, Peng S S, Shi X Y, Seneviratne S I, Wang Y P. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 432-436.
- [21] Chen T X, Zhou S J, Liang C Z, Hagan D F T, Zeng N, Wang J, Shi T T, Chen X, Dolman A J. The greening and wetting of the Sahel have leveled off since about 1999 in relation to SST. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2723.
- [22] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [23] Erb K H, Luyssaert S, Meyfroidt P, Pongratz J, Don A, Kloster S, Kuemmerle T, Fetzel T, Fuchs R, Herold M, Haberl H, Jones C D, Marín - Spiotta E, McCallum I, Robertson E, Seufert V, Fritz S, Valade A, Wiltshire A, Dolman A J. Land management: data availability and process understanding for global change studies. *Global Change Biology*, 2017, 23(2): 512-533.
- [24] Brovkin V, Boysen L, Arora V K, Boisier J P, Cadule P, Chini L, Claussen M, Friedlingstein P, Gayler V, van den Hurk B J J M, Hurlt G C, Jones C D, Kato E, de Noblet-Ducoudré N, Pacifico F, Pongratz J, Weiss M. Effect of anthropogenic land-use and land-cover changes on climate and land carbon storage in CMIP5 projections for the twenty-first century. *Journal of Climate*, 2013, 26(18): 6859-6881.
- [25] Pongratz J, Reick C H, Houghton R A, House J I. Terminology as a key uncertainty in net land use and land cover change carbon flux estimates. *Earth System Dynamics*, 2014, 5(1): 177-195.
- [26] Prestele R, Alexander P, Rounsevell M D A, Arneeth A, Calvin K, Doelman J, Eitelberg D A, Engström K, Fujimori S, Hasegawa T, Havlik P, Humpenöder F, Jain A K, Krisztin T, Kyle P, Meiyappan P, Popp A, Sands R D, Schaldach R, Schüngel J, Stehfest E, Tabreau A, Van Meijl H, Van Vliet J, Verburg P H. Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global - scale model comparison. *Global Change Biology*, 2016, 22(12): 3967-3983.
- [27] Wenzel S, Cox P M, Eyring V, Friedlingstein P. Projected land photosynthesis constrained by changes in the seasonal cycle of atmospheric CO₂. *Nature*, 2016, 538(7626): 499-501.
- [28] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin III F S. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [29] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [30] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, Xu X L, Qin Y W, Ning J, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Wu S X, Shi X Z, Jiang N, Yu D S, Pan X Z, Chi W F. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195-210.
- [31] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [32] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, Chen J M, Ciais P, Cescatti A, Sardans J, Janssens I A, Wu M S, Berry J A, Campbell E, Fernández-Martínez M, Alkama R, Sitch S, Friedlingstein P, Smith W K, Yuan W P, He W, Lombardozzi D, Kautz M, Zhu D, Lienert S, Kato E, Poulter B, Sanders T G M, Krüger I, Wang R, Zeng N, Tian H Q, Vuichard N, Jain A K, Wiltshire A, Haverd V, Goll D S, Peñuelas J. Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 2020, 370(6522): 1295-1300.
- [33] Yan H M, Liu J Y, Huang Q, Tao B, Cao M K. Assessing the consequence of land use change on agricultural productivity in China. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1/2): 13-19.

- [34] Yan H M, Liu F, Liu J Y, Xiao X M, Qin Y W. Status of land use intensity in China and its impacts on land carrying capacity. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(4): 387-402.
- [35] Pinzon J E, Tucker C J. A non-stationary 1981-2012 AVHRR NDVI_{3g} time series. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 6929-6960.
- [36] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 成文连. 生态影响评价中“土地利用分类系统”探讨. *环境与发展*, 2019, 31(9): 17-18, 21-21.
- [40] Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth. *Science*, 2017, 356(6343): 1180-1184.
- [41] 何航, 张勃, 侯启, 李帅, 马彬, 马尚谦. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数 (NDVI) 变化特征及对气候变化的响应. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [42] Li Y, Piao S L, Li L Z X, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Huang L, Lian X, Peng S S, Zeng Z Z, Wang K, Zhou L M. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.
- [43] Brandt M, Mbaw C, Diouf A A, Verger A, Samimi C, Fensholt R. Ground - and satellite - based evidence of the biophysical mechanisms behind the greening Sahel. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1610-1620.
- [44] Ju J C, Masek J G. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984-2012 Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 1-16.
- [45] Park T, Ganguly S, Tømmervik H, Eugénie S, Euskirchen E S, Høgda K A, Karlsen S R, Brovkin V, Nemani R R, Myneni R B. Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(8): 084001.
- [46] Chen L, Dirmeyer P A. Adapting observationally based metrics of biogeophysical feedbacks from land cover/land use change to climate modeling. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3): 034002.
- [47] Hirsch A L, Guillod B P, Seneviratne S I, Beyerle U, Boysen L R, Brovkin V, Davin E L, Doelman J C, Kim H, Mitchell D M, Nitta T, Shiogama H, Sparrow S, Stehfest E, van Vuuren D P, Wilson S. Biogeophysical impacts of land-use change on climate extremes in low-emission scenarios: results from HAPPI-Land. *Earth's Future*, 2018, 6(3): 396-409.
- [48] Singh D, McDermid S P, Cook B I, Puma M J, Nazarenko L, Kelley M. Distinct influences of land cover and land management on seasonal climate. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(21): 12017-12039.
- [49] Huang L, Zhai J, Sun C Y, Liu J Y, Ning J, Zhao G S. Biogeophysical forcing of land-use changes on local temperatures across different climate regimes in China. *Journal of Climate*, 2018, 31(17): 7053-7068.
- [50] 吴迪, 张冬有. 1990—2015 年东北三省土地利用/覆被时空变化特征及其驱动力分析. *江苏农业科学*, 2018, 46(8): 268-274.
- [51] Prestele R, Arneth A, Bondeau A, de Noblet-Ducoudré N, Pugh T A M, Sitch D, Stehfest E, Verburg P H. Current challenges of implementing anthropogenic land-use and land-cover change in models contributing to climate change assessments. *Earth System Dynamics*, 2017, 8(2): 369-386.