

2000—2015年中蒙俄经济走廊东段冻土 时空变化及植被响应

刘侦海¹, 王绍强^{1,2,3}, 陈斌²

(1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所
生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 中蒙俄经济走廊东段位于欧亚大陆多年冻土区东南缘及森林线南界接近区, 冻土及生态环境脆弱。本文基于MERRA-Land陆面模式离线运行产品分析了中蒙俄经济走廊东段2000—2015年间冻土冻融的时空变化模式, 以及冻土变化对返青期和全年不同阶段植被生长状态的影响。研究表明: 2000—2015年间研究区多年冻土及季节冻土均持续退化, 时间上主要表现为冻土提前解冻、延迟冻结; 空间上主要表现为多年冻土南界的多年冻土退化和季节冻土下限抬升, 及连续多年冻土南界的活动层加厚。解冻始日是森林地区植被返青的主控要素, 林下冻土解冻对土壤含水量的增加及沼泽湿地的隔热蓄水功能影响了森林地区植被的生长。但随着多年冻土南界森林及林下泥炭地演替为草甸和农田, 多年冻土退化, 进一步促进林下沼泽湿地的消失。探讨冻土退化与生态环境之间的协同关系, 有助于识别气候变暖和人类活动叠加影响下的冻土退化脆弱区以及生态环境敏感区。

关键词: 中蒙俄经济走廊东段; 冻土退化; 植被生长; 灰色关联分析

DOI: 10.11821/dlxz202105014

1 引言

中蒙俄经济走廊东段位于欧亚大陆多年冻土区的东南缘, 广泛分布多年冻土和季节冻土^[1], 属于全球气候变化的脆弱区和敏感区^[2]。冻土变化不仅通过改变地气间水热交换过程影响生态和气候系统, 同时会通过影响碳周转进而影响全球的碳循环和气候变化^[2-3]。随着“一带一路”倡议的推进, 中蒙俄跨境铁路、公路和油气管道作为支撑中蒙俄经济走廊区域合作发展的关键枢纽和通道^[4], 其沿线区域的冻土退化问题直接关系到跨境道路和油气管道建设及生态环境安全。人类经济活动逐年增强和气候转暖2种因素叠加形成的“马太效应”将进一步导致植被群落演替。冻土退化对于寒区不同类型植被群落可具有促进作用^[5]或抑制作用^[6]; 不同的地表植被覆盖也会对土的冻融产生正负反馈。模型的发展解决了利用站点或遥感数据进行的研究无法兼顾水平及垂直尺度的问题^[1, 7], 从而在研究冻土变化与植被生长的相互调节方面得到了广泛应用^[8-9]。

收稿日期: 2020-08-09; 修订日期: 2021-04-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA20030203); 中国地质大学(武汉)科研启动基金资助项目(162301192642) [Foundation: The Science and Technology Strategic Pilot of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20030203; Scientific Research Foundation of China University of Geosciences, No.162301192642]

作者简介: 刘侦海(1996-), 男, 山东菏泽人, 硕士生, 主要从事生态系统变化与生态模拟相关研究。

E-mail: lzhzlw@cug.edu.cn

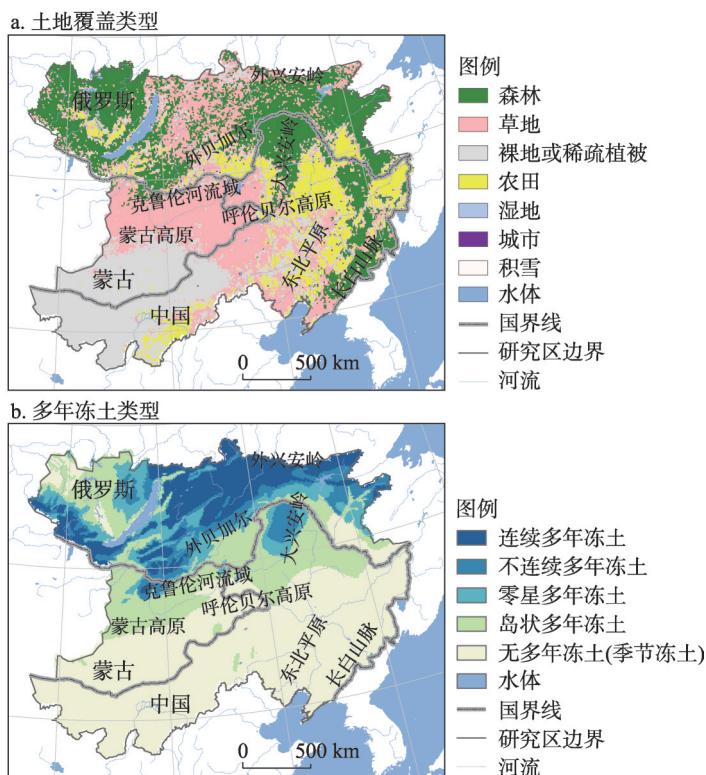
通讯作者: 陈斌(1981-), 男, 福建福州人, 助理研究员, 主要从事生态系统生态学相关研究。E-mail: chenbin@igsnrr.ac.cn
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

本文基于2000—2015年的MERRA-Land陆面模式离线数据、MODIS EVI数据、GLOMAP LAI等数据分析了欧亚多年冻土区东南缘中蒙俄经济走廊东段地区土壤冻融、植被LAI及植被返青期的时空分布规律。在此基础上,通过灰色关联分析法计算了植被LAI和返青期时空变化的主控因素,进而分析典型地区植被生长对土壤冻融变化的响应,为中蒙俄经济走廊东段生态环境脆弱区识别及保护提供了相关依据^[10]。

2 材料和方法

2.1 研究区域介绍

中蒙俄经济走廊东段位于中国、蒙古、俄罗斯三国交界,地貌类型以平原和高原为主,海拔分布在0~3000 m之间。据NCEP再分析数据(2000—2015年),研究区年均气温-6~10 °C,年均降水量100~1300 mm^[11]。研究区位于欧亚大陆多年冻土南界及林线南界接近区,植被覆盖^[12]和冻土^[13]类型多样(图1)。多年冻土主要分布于50°N以北,包括连续、不连续、零星和岛状多年冻土(多年冻土的面积占比分别为:90%~100%、50%~90%、10%~50%和0~10%)^[13]。50°N以南地区广泛分布季节冻土和山地或高山、高原多年冻土;浅表层土壤在冬季冻结、夏季融化。多年冻土地区53.3%的土地覆盖着森林,而季节冻土地区的主要土地覆盖类型为裸地或稀疏植被、草地和农田(面积占比分别为36.8%、26.0%和23.0%)。



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4623号标准地图制作,底图无修改。

图1 中蒙俄经济走廊东段土地覆盖^[12]及多年冻土类型^[13]空间分布

2.2 数据来源和评价

2.2.1 MERRA-Land 陆面模式离线数据 本文基于 MERRA-Land (Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications) 陆面模式离线运行产品^[14]分析中蒙俄经济走廊东段土壤冻融的时空变化及其对植被生长和物候期的影响。MERRA-Land 的空间分辨率为 1.5° 经度 $\times 0.5^{\circ}$ 纬度, 将土壤温度分为 6 层 ($0\sim10$ cm、 $10\sim30$ cm、 $30\sim70$ cm、 $70\sim150$ cm、 $1.5\sim3.0$ m 和 $3.0\sim13.0$ m); 土壤湿度分为 2 层, 即表层 (2 cm) 和根区层 ($0.75\sim1.0$ m)^[14]。

基于研究区内 13 个站点的钻孔土温观测数据对 MERRA-Land 土壤温度数据进行精度验证。站点选择尽量均匀覆盖整个研究区范围及不同深度土壤层, 且每个站点的土壤温度数据至少包含单层土壤的一年连续日步长数据。提取站点所在像元的 MERRA-Land 各层土壤温度数据, 并线性插值到站点数据对应的深度。2 类数据间各站点多层平均 RMSE 为 4.23, 平均 MAE 为 3.48, 平均 R^2 为 0.91 (表 1), 与当前主流多层次土壤温度空间数据集的精度相近^[15]。这说明, MERRA-Land 土壤温度数据可以相对准确地刻画研究区土壤剖面温度的时空变化。由于植被生长主要受近地表根区层及以上土壤层冻融状态的影响, 因此本文选取了该数据集中的 1~5 层日步长土壤温度和根区土壤湿度数据, 以表示根区层的土壤温度和湿度情况。同时选取植被蒸腾速率数据表示地表植被生长状态。

表 1 用于验证 MERRA-Land 土壤温度数据集精度的站点

Tab. 1 Sites to verify the accuracy of the MERRA-Land soil temperature data set

站点	时段/年份	深度(m)	经纬度	海拔高度 (m)	来源	MERRA-Land 土壤温度数据 多层次平均精度		
						RMSE	MAE	R^2
SW2	2010	0.1	111.9°E , 41.79°N	1457	FLUXNET ^[16]	4.73	4.04	0.96
DU3	2009—2010	0.1	116.28°E , 42.06°N	1293	FLUXNET ^[17]	4.39	3.81	0.89
CNG	2007—2010	0.05	123.51°E , 44.59°N	140	FLUXNET ^[18]	2.6	2.02	0.98
DXF	2003—2005	0, 0.05, 0.4, 1	121.51°E , 50.96°N	832	国家生态系统观 测研究网络 ^[19]	6.71	5.31	0.87
HLA	2014	0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.4, 0.6, 1	126.93°E , 47.45°N	206	国家生态系统观 测研究网络 ^[19]	4.91	4.09	0.91
CHB	2003—2005	0.1	128.1°E , 42.4°N	738	国家生态系统观 测研究网络 ^[19]	3.03	2.23	0.95
SKT	2003—2006	0.1	108.65°E , 48.35°N	1630	AsiaFlux ^[20]	4.3	3.11	0.98
KBU	2004—2005	0.1	108.74°E , 47.21°N	1235	AsiaFlux ^[21]	4.29	3.43	0.92
Olkhon	2012	0.5, 1, 1.5, 3.65	107.45°E , 53.22°N	649	GTN-P ^[22]	3.28	2.52	0.95
Azarova	2008—2009	0.5, 1	117.58°E , 56.9°N	2142	GTN-P ^[23]	2.82	2.24	0.91
Most	2012—2015	5	118.28°E , 56.91°N	708	GTN-P ^[23]	3.79	3.61	0.78
Chara	2007—2009, 2013—2015	3.6, 5	118.36°E , 56.67°N	1244	GTN-P ^[23]	3.09	2.71	0.7
Ushelistiy	2009—2015	0.3	118.48°E , 56.54°N	1967	GTN-P ^[23]	7.08	6.21	0.95

2.2.2 植被返青期数据 春季具有比秋季更高的气候变暖速率^[24], 讨论春季植被返青与冻土解冻的关系具有重要意义。本文基于 MODIS 增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 计算的返青期物候数据产品 (MCD12Q2) 来表示春季植被生长季开始的时间, 时间段为 2001—2015 年, 空间分辨率为 500 m^[25]。该数据产品利用分段 Logistic 模型拟合 8 天步长的 EVI 时间序列, 确定生长季开始时间、成熟期、峰值、末期、结束时间和 EVI 持续增加或降低的中点^[26]。MCD12Q2 已广泛用于全球范围内的植被物候变化研究^[27-28]。

2.2.3 植被叶面积指数数据 植被叶面积指数 (LAI) 作为生态系统研究中的重要结构参数, 可以反映植被叶面数量、冠层结构变化和植被群落生长状态、生命活力等^[5]。LAI 输入数据为中国科学院地理科学与资源研究所 GLOBMAP LAI 数据产品, 选取时间段为 2000—2015 年。该数据产品由 AVHRR LAI (1981—2000 年) 和 MODIS LAI (2000—2015 年) 组合而成, 空间分辨率为 8 km^[29]。

2.3 数据处理与指标计算

为方便对不同来源的数据进行对比分析和计算, 采用双线性插值法将所有数据插值为 0.1°×0.1° 分辨率。

基于 MERRA-Land 日步长土壤温度数据, 假设单层土壤温度小于临界温度 0 °C 的土壤层处于冻结状态, 即位于冻土区, 包括多年冻土和季节冻土; 大于 0 °C 则处于解冻状态。本文主要考虑地表植被生长状态对表层土壤解冻和冻结变化的响应。每年顶部两层土壤 (0~30 cm) 第一次出现连续 5 天均处于解冻状态时, 将 5 天中的第 3 天定义为该地区的土壤解冻始日^[30]; 7 月 1 日后顶部 2 层土壤第一次出现连续 5 天均处于冻结状态时, 将 5 天中的第 3 天定义为该区的土壤冻结始日。解冻始日和冻结始日均使用儒略日表示。冻融层厚度指地壳表层每年冬季冻结、夏季融化的岩土层的厚度。冻融层若处于多年冻土地区则称为活动层, 处于季节冻土地区称为季节冻土层^[31]。冻土下限 (包括多年冻土下限和季节冻土下限) 指冻土层下部底面的深度。受所用土壤温度数据限制, 本文将大于 3 m 的冻融层厚度及冻土下限均设为 3 m。

$RZMC_{May}$ 表示 5 月月均根区层土壤含水量。每年的植被返青期使用 MCD12Q2 数据产品中的 “Greenup” 指标表示^[25-26]。基于 GLOBMAP LAI 数据集, 对比了植被生长季初期 (5 月份) 平均 LAI (LAI_{May})、生长季 (5—10 月) 平均 LAI 及全年的平均 LAI, 以分析不同时间段植被的生长状态。

采用灰色关联分析法, 研究影响各阶段植物生长的主要胁迫因子。灰色关联分析可度量两个系统或两个因素间的相关性, 识别影响目标变量的相关因素中的主控要素^[32], 已广泛用于环境^[33]、水文^[34]和冻土学^[35]等领域的研究中。本文中将每个像元的返青期、LAI 等植被指标的时间序列作为目标变量, 将解冻始日、气温、降水等冻土和环境要素作为影响变量。某一目标变量的时间序列为 { $X_o(t)$ } (t 为时间步长, $t = 1, 2, \dots, m$); 影响变量 i 的时间序列为 { $X_i(t)$ } (t 为时间步长, $t = 1, 2, \dots, m$)。为了消除 { $X_i(t)$ } 的量纲和量级差异对结果的影响, 先对其时间序列进行归一化处理。在某一时间步长 t , 灰色关联系数表达为:

$$\xi_{oi}(t) = \frac{\min_i \left(\min_t (\Delta_{oi}(t)) \right) + \rho \max_i \left(\max_t (\Delta_{oi}(t)) \right)}{\Delta_{oi}(t) + \rho \max_i \left(\max_t (\Delta_{oi}(t)) \right)} \quad (1)$$

式中: $\xi_{oi}(t)$ 为影响变量 { $X_i(t)$ } 与目标变量 { $X_o(t)$ } 之间的灰色关联系数; ρ 为分辨系数, 参考以往研究, 在本文中将 ρ 取为 0.5^[36]。最后, 通过灰色关联系数可以计算影响变

量 $\{X_i(t)\}$ 与目标变量 $\{X_o(t)\}$ 之间的灰色关联度, 用以表达二者之间的联系紧密程度, 表达式为:

$$G_{oi} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \xi_{oi}(t) \quad (2)$$

式中: G_{oi} 是影响变量 $\{X_i(t)\}$ 与目标变量 $\{X_o(t)\}$ 之间的灰色关联度。通过比较多个影响变量 $\{X_i(t)\}$ 与目标变量 $\{X_o(t)\}$ 之间的灰色关联度, 判断影响变量对目标变量的重要程度^[5]。具有最大灰色关联度的影响变量, 为影响某一目标变量的主导影响因素, 即主控要素; 仅次于主控要素灰色关联度大小的变量定义为次主控要素。研究区生态系统类型复杂, 解冻始日及返青期空间异质性较高, 难以作为整体分析土壤冻融对植被生长状况的影响。因此, 本文逐像元计算了中蒙俄经济走廊东段各植被指标与冻土、气象指标的灰色关联度系数, 以探究植被生长对冻土退化的响应。

3 结果与分析

3.1 土壤冻融的时空变化

根据2000—2015年的MERRA-Land多层土壤温度数据, 在中蒙俄经济走廊东段, 各土壤层的年均冻土区总面积均逐年减小, 平均减小速率为 $0.16 \times 10^5 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ (图2b)。各层每日同期冻土区总面积减少的发生时间段主要分布在每年第50~150日(约3—5月份)及第250~350日(约9—11月份)。该时间范围分别为各土壤层的解冻期和冻结期(图2a)。同时, 研究区平均解冻始日提前速率为 0.51 d a^{-1} , 平均冻结始日延后速率为 0.37 d a^{-1} 。解冻始日提前和冻结始日延后使冻土提前解冻、延迟冻结, 导致解冻期及冻结期的同期冻土区总面积减小。

研究区年解冻始日具有明显的纬度地带性和区域性规律(图3a)。解冻始日随北纬纬度增加逐渐延后, 但局部地区有差异。邻近多年冻土南界(约50°N)的地区对气候变化较为敏感, 大面积深层多年冻土退化为季节冻土, 冻融层厚度增加(图3c)。空间上, 该区域南侧为季节冻土区, 越向南年冻土下限越浅, 季节冻土层越薄。北侧为多年冻土区, 冬季各土壤层几乎全部冻结, 暖季顶层一定厚度的土壤将解冻, 且越向北暖季解冻的土壤越少, 活动层厚度越小。

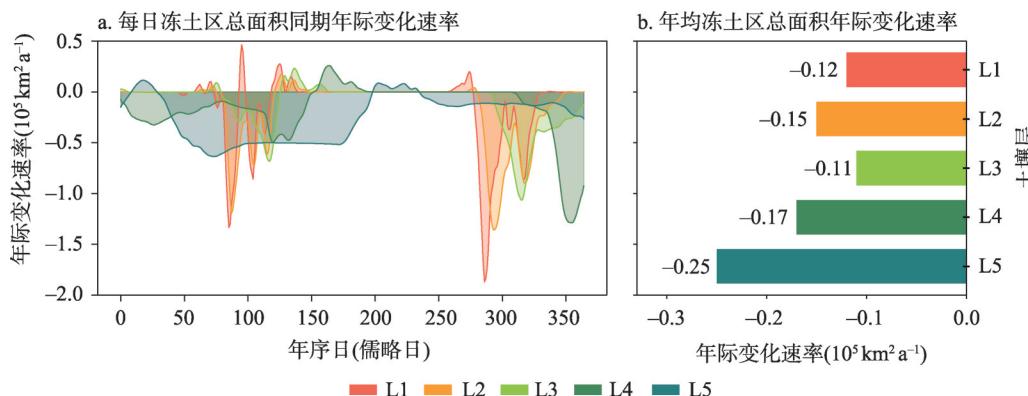
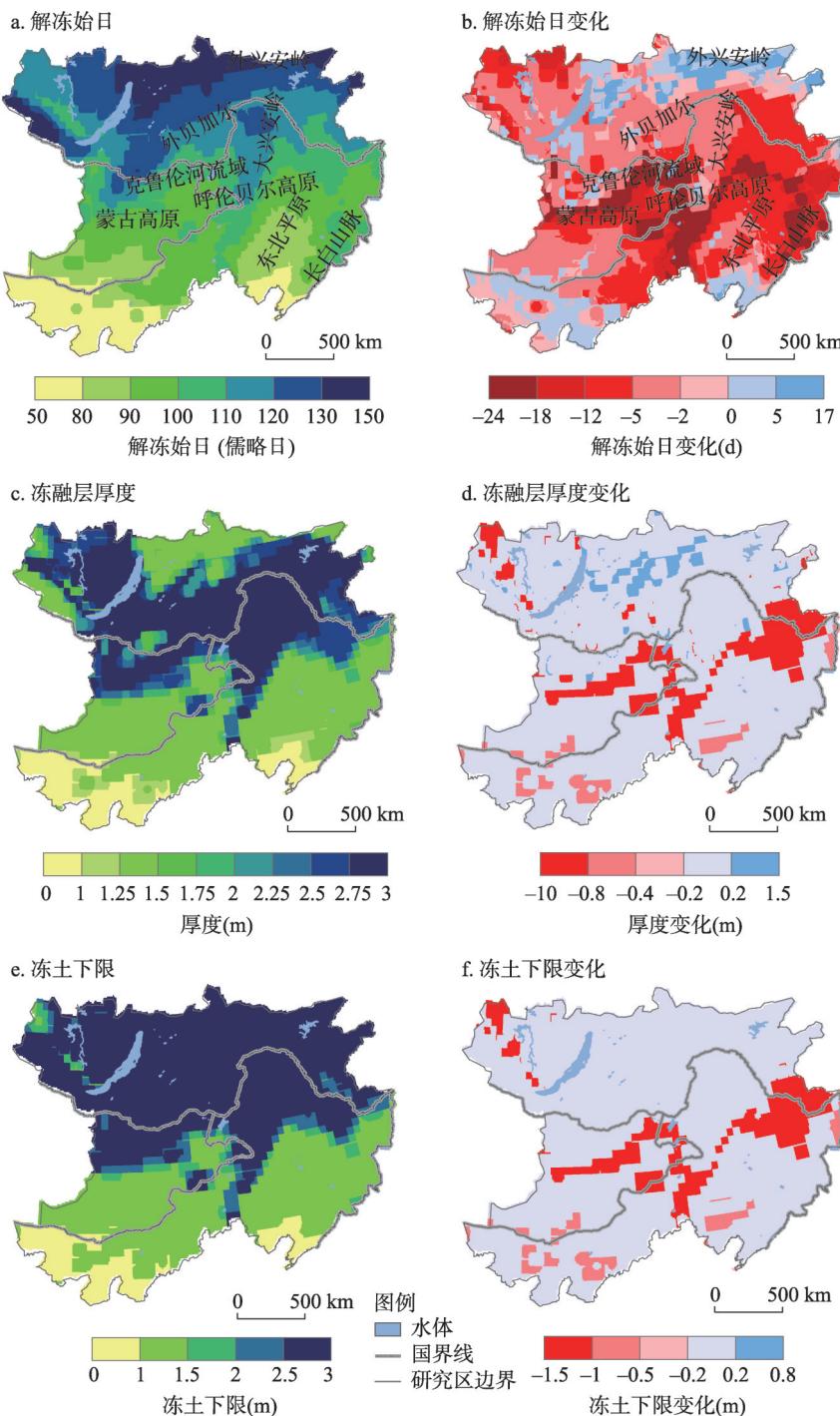


图2 2000—2015年中蒙俄经济走廊东段各土壤层冻土区总面积平均年际变化速率



注：基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4623 号标准地图制作，底图无修改。

图3 2000—2015年中蒙俄经济走廊东段平均冻土解冻始日、冻融层厚度、

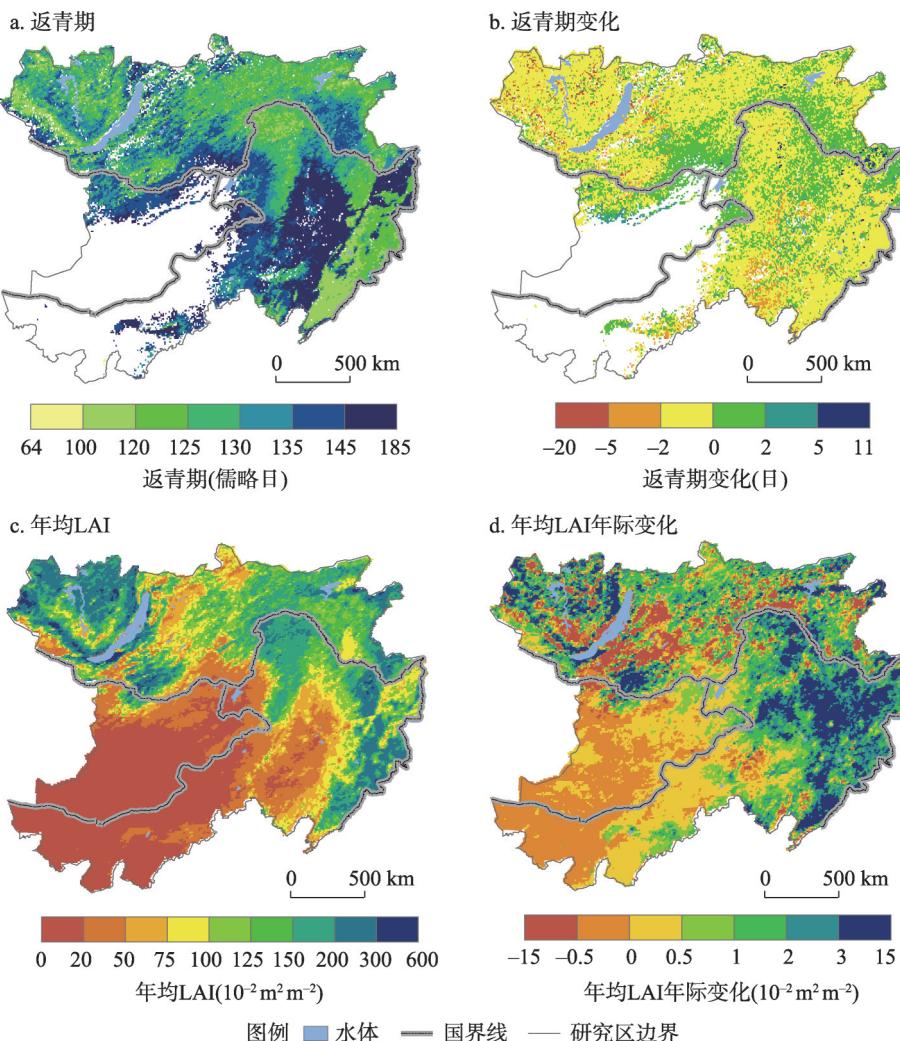
冻土下限空间分布格局及 16 a 变化量

Fig. 3 Spatial distribution and variability across the 16 years of the onset of ground thawing date, the thickness of freeze/thaw layer, and lower limit of frozen ground in the eastern segment of China-Mongolia-Russia economic corridor
 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

2000—2015年冻融层厚度时间上发生变化地区主要分布在多年冻土南界的南侧及连续多年冻土南界的北侧(图3d)。前者主要表现为季节冻土下限抬升,多年冻土消失和多年冻土南界北移。后者表现为活动层加厚、多年冻土上限下降等量变过程。本文研究区存在大量多年冻土下限远深于3 m的地区,但由于本文使用的土壤剖面温度数据最深为3 m,表现不出这些地区冻土下限的变化。季节冻土下限的抬升使研究区内季节冻土由底层向上逐渐退化,底层冻土区总面积减少速度大于表层(图2b)。

3.2 返青期及叶面积指数的时空变化

研究区内植被返青期主要分布在100~170儒略日(4月10日—6月19日)之间,LAI大小主要介于0.2~3 $m^2 \cdot m^{-2}$ 之间,2个植被指标的空间分布与土地覆盖类型存在密切关系(图4)。东西伯利亚和长白山脉森林覆盖区具有较早的返青期和较高的叶面积指数,且



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4623号标准地图制作,底图无修改。

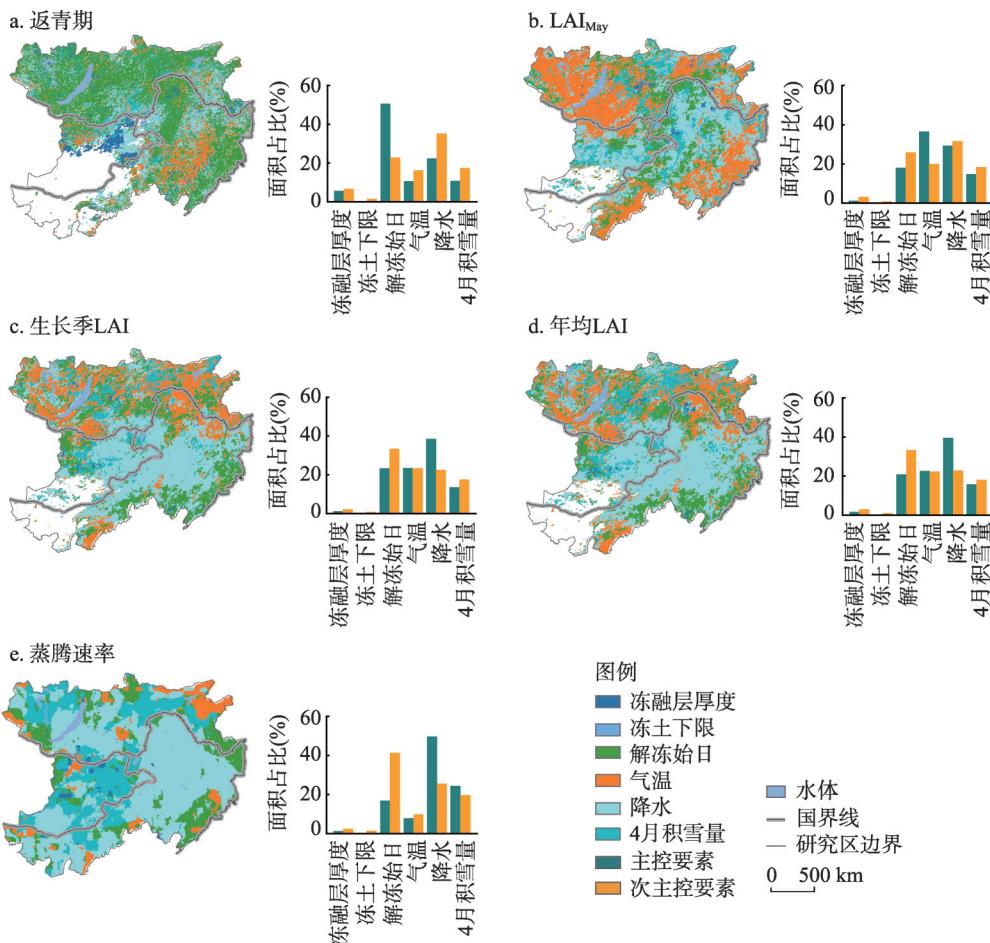
图4 2000—2015年中蒙俄经济走廊东段植被返青期与年均LAI的空间分布格局及年际变化

Fig. 4 Spatial distribution and interannual variability of the start of vegetation greening season and

76.3%的森林植被返青期呈提前趋势，81.4%的森林植被LAI进一步增加。草地、灌木等低矮植被主要分布在干旱裸地地区边缘及外贝加尔部分地区，由于气候相对干旱，植被生长较慢；相比森林地区，返青期平均迟后9 d，植被LAI平均减小 $0.928 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 。同时，63.7%的草地植被返青期提前，77.5%的草地植被LAI增加。东北平原属于农业耕作区，植被生长受人为影响较大，作物的返青期及LAI与周围地区差异明显。研究区西南部干旱区植被稀少，难以监测植被的生长状态，缺少返青期数据。

3.3 冻土变化与植被生长状况的关联度分析

研究区植被返青期的主控要素中解冻始日面积占比最高，达到50.7%（图5a）；其中面积占比48%的森林地区的返青期与解冻始日关联度最高。解冻始日是影响研究区内植被返青期变化的主控要素，而森林是受解冻始日影响最大的地表覆盖类型。呼伦贝尔高原及克鲁伦河流域等草地覆盖区主要位于岛状多年冻土带（图1），冻融层厚度、冻土下限与解冻始日的变化较为剧烈（图3）；植被返青期主控要素为冻融层厚度的地区中有55.8%的像元位于草地覆盖区。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4623号标准地图制作，底图无修改；

柱状图表示各目标变量的主控要素和次主控要素对应影响变量像元总面积占比

图5 中蒙俄经济走廊东段各植被指标主控要素空间分布

对于 LAI_{May} 、生长季 LAI 和年均 LAI，主控要素为气温的地区分别有面积占比 50.1%、65.0% 和 63.8% 的像元位于森林覆盖区，主控要素为降水的地区分别有面积占比 53.8%、67.1% 和 66.3% 的像元位于草地或农田覆盖区（图 5b、5c 和 5d）。气温主要影响森林地区全年各阶段的 LAI，而降水则与草地和农田的 LAI 关联度最高。

降水与植被蒸腾速率关联度最高地区面积占比为 49.7%；其通过增加土壤及大气环境中的水分作用于植被蒸腾作用，进而影响植被生长。森林植被冠层能够截留降雪和降低林下风速，影响林下积雪的累积和消融过程，间接影响冻土的水热过程^[37]；同时减小林下积雪厚度。各植被指标主控要素为 4 月积雪量的地区中平均有 37.1% 的草地和 38.3% 的森林，尽管草地在整个区域内的面积占比更小，为 28.6%。证明森林冠层截留削弱了积雪融水对林区植被返青和生长的影响，而草地等低矮植被区植被的生命活动更依赖积雪融水。

对于植被返青期、蒸腾速率和全年各阶段的 LAI，降水及解冻始日均具有较强的影响。降水为主控要素和次主控要素地区的面积占比平均为 35.9% 和 26.8%，解冻始日为主控要素和次主控要素地区的面积占比平均为 26.0% 和 31.7%。解冻始日的提前通过延长冻土解冻期持续时间^[10]促进冻土解冻，间接增加生长季初期土壤含水量。土壤含水量的变化调节植被根的呼吸作用，影响生长季地表植被的生长状态。同时，因多年冻土层的隔水作用而滞留在冻土层上层的水分随冻土退化而流失，使沼泽湿地演化为草甸等植被类型，促进植被生长状态变化。

4 讨论

4.1 冻土解冻提前调节植被物候期

森林地区中解冻始日对植被返青期贡献度最高。在目标变量为返青期，主控要素为解冻始日的地区，返青期与解冻始日时序变化具有高度的相关性 (R 为 0.92)，且两者均呈提前趋势（图 6a）。根区土壤含水量 (RZMC_{May}) 与解冻始日、植被返青期及生长季平均 LAI 具有一定的正相关性， R 分别为 0.44、0.38 和 0.45（图 6b）。冻土解冻增加根区土壤含水量，调节根系呼吸，使植被返青进入生长季，并促进生长季植被的生长。该地区

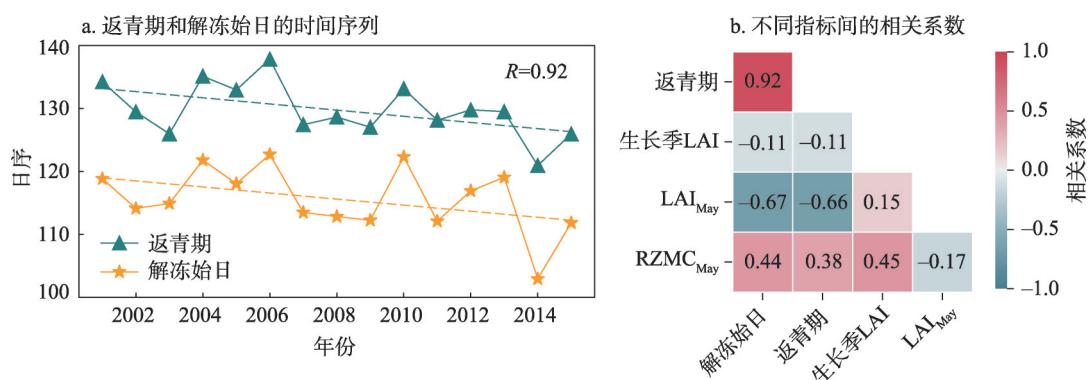


图 6 中蒙俄经济走廊东段返青期主控因子为解冻始日的地区返青期和解冻始日的时间序列及不同指标间的相关系数

Fig. 6 The time series of the start of vegetation greening season and the onset of soil thawing and the correlation coefficient between different indexes in the area with the highest gray relational grade between the onset of soil thawing and the start of vegetation greening season in the eastern segment of China-Mongolia-Russia economic corridor
 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

解冻始日和返青期与 LAI_{May} 具有显著的负相关关系 (R 分别为 -0.67 和 -0.66)；冻土解冻和返青期的提前标志着植被开始生长时间提前，增加了生长季早期的植被 LAI 。

对于多年冻土南界以外地区，植被类型未发生显著变化，且全年各阶段 LAI 对解冻始日变化的响应均弱于气候因素（图 5）。研究区多年冻土区适宜落叶松等针叶林及林下灌木、苔草等的生长。谷底、洼地等排水条件差的地方，苔草下沼泽土及泥炭土相当发育^[38]。沼泽湿地的隔热和蓄水功能减缓活动层能量交换，降低地表温度，推迟表层季节冻土解冻始日，进而影响地表植被返青（图 3b）。冻土解冻始日的变化通过限制植被根的呼吸影响地表植被物候期^[39]，但全年各阶段植被的生长则主要受气候因素影响。

4.2 兴安岭多年冻土与植被的相互调节

兴安岭地区具有比邻区更低的年平均气温，促进了冻土的发育和保存^[40]。同时在山区冬季逆温层及泥炭层热补偿等的叠加作用下，形成了典型的“兴贝型多年冻土”，具有与高海拔和高纬地区截然不同的多年冻土发育特征^[41]。典型的气候及环境特征^[41]限制了该区冻土的退化（图 3），促使北方多年冻土南界在该地区向南显著突出（图 1）。兴安岭地区的植被返青期的主控因素主要为土壤解冻始日（图 5a）。同时，与其他森林地区相比，该区 LAI_{May} 、生长季 LAI 及年均 LAI 的主控要素仍有大部分地区为土壤解冻始日（图 5b、5c 和 5d）。大兴安岭北部多年冻土广泛发育，且分布有大量兴安落叶松^[42]。冻土环境可以维系兴安落叶松的生长，兴安落叶松生长区又有利于冻土的发育和保存，二者相辅相成。

但近年来区域气候的显著变暖及该区森林植被的锐减导致了普遍的多年冻土退化。同时，多种人为影响在各自作用范围内起到了加速促进作用。在兴安岭地区南缘、多年冻土南界附近，农田成为主要的地表覆盖类型，使林线逐渐北移。森林及林下泥炭地变为农田后，土壤水分减少，导热率增大，促进“兴贝型多年冻土”的退化。多年冻土退化减弱表层蓄水能力，进一步促进沼泽湿地演化为草甸。在中蒙俄跨境铁路、公路和油气管道等的建设期施工期间，地表植被生态环境将被破坏，导致局部地段湿地退化。工程运行期间，管道油温对沿线冻、融土的水热状态产生影响，进而影响湿地生态环境。

4.3 与其他研究区域的比较

Guo 等研究表明，欧亚大陆东部中高纬度地区森林与草地覆盖下的土壤冻结始日存在较小差距，而冻土解冻始日差异较大^[1]。与欧亚大陆西部的常绿针叶林和北美地区的混交林等冻土区林型不同^[43]，中蒙俄经济走廊东段森林地区的主要林型为落叶针叶林。落叶针叶林区泥炭层有利于冻土的保存和发育^[41]，在春季冻土解冻期间能够更有效地减缓、减少冻土解冻，形成较慢的冻土退化速度。但森林演化为草地或农田后，冻土的退化将加速。这与青藏高原地区的研究结果一致^[44]。青藏高原冻土地区主要植被类型为高寒草甸或高寒荒漠草原，活动层厚度的增加速度显著大于其他地区。1966—2004 年间青藏铁路沿线的冻土融化指数呈增加趋势^[45]，工程建设将破坏地表植被覆盖，对施工地带的高寒生态系统产生干扰^[46]。在中蒙俄经济走廊东段，随着铁路和输油管线的建设，气候变暖和人为活动两种因素叠加将加速冻土退化，影响气候变化。

5 结论

本文基于 MERRA-Land 离线数据集综合分析了中蒙俄经济走廊东段 2000—2015 年的冻土冻融的时空变化过程，并评估了冻土冻融变化对区域植被生长状况、物候时间的影响。

(1) 2000—2015年中蒙俄经济走廊东段冻土明显退化,时间上主要表现为冻土提前解冻、延迟冻结;空间上主要表现为多年冻土南界的多年冻土退化和季节冻土下限抬升,及连续多年冻土南界的活动层加厚。季节冻土下限的抬升使底层冻土区面积减少速度大于表层。

(2) 森林地区中解冻始日对植被返青期贡献度最高,面积占比达48%。林下冻土解冻增加根区土壤含水量,调节根系呼吸,使植被进入生长季。沼泽湿地的隔热和蓄水作用减弱活动层能量交换,降低地表温度,推迟冻土解冻,影响植被返青。

(3) 随着区域气候变化及人为的开发,欧亚大陆森林线南界森林及林下泥炭地逐渐演替为草地或农田,促进“兴贝型多年冻土”的退化。冻土退化削弱土壤表层蓄水能力,进一步促进沼泽湿地演替。气候变暖和人为影响两种因素叠加将加速中蒙俄经济走廊东段地区的冻土退化,威胁生态平衡。

尽管基于模式模拟的数据进行的研究克服了站点数据空间连续性差、遥感数据反演土壤温度纵深浅的问题,但若与站点或遥感数据等不同数据源结合将可以在纵向或横向更精确地表现冻土退化的时空变化。同时,土壤—植被—大气之间的相互关系可能会因模型模拟或遥感产品精度问题产生较大不确定性,系统的分析仍需长期、全面的实地观测研究。

参考文献(References)

- [1] Guo W C, Liu H Y, Anenkhonov O A, et al. Vegetation can strongly regulate permafrost degradation at its southern edge through changing surface freeze-thaw processes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 252(23): 10-17.
- [2] Jin Huijun, Li Shuxun, Wang Shaoling, et al. Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 161-173. [金会军, 李述训, 王绍令, 等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响. 地理学报, 2000, 55(2): 161-173.]
- [3] Zhao L, Cheng G D, Ding Y J. Studies on frozen ground of China. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(4): 411-416.
- [4] Fan Zemeng, Li Saibo. Spatio-temporal pattern change of desertification and its driving factors analysis in China-Mongolia-Russia economic corridor. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4252-4263. [范泽孟, 李赛博. 中蒙俄经济走廊荒漠化时空格局变化及其驱动因子. 生态学报, 2020, 40(13): 4252-4263.]
- [5] Qin Y, Lei H M, Yang D W, et al. Long-term change in the depth of seasonally frozen ground and its ecohydrological impacts in the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 204-221.
- [6] Jin H J, He R X, Cheng G D, et al. Changes in frozen ground in the source area of the Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China, and their eco-environmental impacts. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 45206. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045206.
- [7] Ma Shuai, Sheng Yu, Cao Wei, et al. Numerical simulation of spatial distribution and change of permafrost in the source area of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1621-1633. [马帅, 盛煜, 曹伟, 等. 黄河源区多年冻土空间分布变化特征数值模拟. 地理学报, 2017, 72(9): 1621-1633.]
- [8] Jin X Y, Jin H J, Iwahana G, et al. Impacts of climate-induced permafrost degradation on vegetation: A review. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(1): 29-47.
- [9] Nan Zhuotong, Huang Peipei, Zhao Lin. Permafrost distribution modeling and depth estimation in the Western Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(3): 318-327. [南卓铜, 黄培培, 赵林. 青藏高原西部区域多年冻土分布模拟及其下限估算. 地理学报, 2013, 68(3): 318-327.]
- [10] Ge Jun, Xu Yongfei, An Xueyang, et al. Analysis and research on ecologically sensitive area of China-Mongolia-Russia economic corridor the background of "Belt and Road". *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5051-5057. [葛君, 徐永飞, 安雪洋, 等. “一带一路”背景下中蒙俄经济走廊生态敏感区分析. 生态学报, 2019, 39(14): 5051-5057.]
- [11] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR reanalysis 40-year project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77: 437-471.

- [12] Kobayashi T, Tateishi R, Alsaideh B, et al. Production of global land cover data: GLCNMO2013. *Journal of Geography and Geology*, 2017, 9(3): 1-15.
- [13] Wu Lizong. Circum-Arctic map of permafrost and ground ice conditions (v2). National Cryosphere Desert Data Center (www.ncdc.ac.cn), 2019. [吴立宗. 环北极地区多年冻土和地下冰状态图 (v2). 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (www.ncdc.ac.cn), 2019.]
- [14] Reichle R H. The MERRA-Land data product. GMAO Office Note 3 (Version 1.2), 2012: 38. <http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Reichle541.pdf>.
- [15] Yu Zhongda, Zhou Guangqing, Zhou Yunjun. Evaluation and analysis of soil temperature data over middle and high latitudes of East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(1): 147-166. [于忠达, 周广庆, 周筠珺. 东亚中高纬土壤温度资料评估与分析. *大气科学*, 2017, 41(1): 147-166.]
- [16] Shao C. FLUXNET2015. CN-Sw2 Siziwang Grazed (SZWG). FLUXNET, 2016. DOI: 10.18140/flx/1440212.
- [17] Shao C. FLUXNET2015 CN-Du3 Duolun Degraded Meadow. FLUXNET, 2016. DOI: 10.18140/flx/1440210.
- [18] Dong G. FLUXNET2015 CN-Cng Changling. FLUXNET, 2016. DOI: 10.18140/flx/1440209.
- [19] Chinese National Ecosystem Research Network/Chinese Ecosystem Research Network. Science and Technology Resources' Service System of Chinese National Ecosystem Research Network, 2015. <http://www.cnern.org.cn>. [国家生态系统观测研究网络/中国生态系统研究网络. 国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统, 2015. <http://www.cnern.org.cn>.]
- [20] Li S G, Asanuma J, Kotani A, et al. Year-round measurements of net ecosystem CO₂ flux over a montane larch forest in Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110: D09303. DOI: 10.1029/2004JD005453.
- [21] Li S G, Asanuma J, Eugster W, et al. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, 2005, 11(11): 1941-1955.
- [22] Kozireva E. TSP Russia Baical. GTN-P, 2014. <http://gtndatabase.org/boreholes/view/1118>.
- [23] Sergueev D. TSP Russia Chara IEG RAS. GTN-P, 2013. <http://gtndatabase.org/boreholes>.
- [24] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [25] Friedl M, Gray J, Sulla-Menashe D. MCD12Q2 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2019. DOI: 10.5067/MODIS/MCD12Q2.006.
- [26] Li Dengke, Wang Zhao. Spatiotemporal variation of vegetation phenology and its response to climate in Qinling Mountains based on MCD12Q2. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(1): 11-22. [李登科, 王钊. 基于 MCD12Q2 的秦岭植被物候时空变化及对气候的响应. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 11-22.]
- [27] Peng D L, Zhang X Y, Wu C Y, et al. Intercomparison and evaluation of spring phenology products using National Phenology Network and AmeriFlux observations in the contiguous United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 242: 33-46.
- [28] Wang Cong, Li Jing, Liu Qinhua, et al. Validation and analysis of remote sensing phenology products in the Heihe River Basin. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(3): 442-457. [王聪, 李静, 柳钦火, 等. 黑河流域遥感物候产品验证与分析. *遥感学报*, 2017, 21(3): 442-457.]
- [29] Liu Y, Liu R G, Chen J M. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981-2011) from combined AVHRR and MODIS data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117: 4003. DOI: 10.1029/2012JG002084.
- [30] Smith N V, Saatchi S S, Randerson J T. Trends in high northern latitude soil freeze and thaw cycles from 1988 to 2002. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109: D12101. DOI: 10.1029/2003JD004472.
- [31] Frauenfeld O W, Zhang T, Barry R G, et al. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109: D5101. DOI: 10.1029/2003JD004245.
- [32] Deng J. Control problems of grey systems. *Systems and Control Letters*, 1982, 1(5): 288-294.
- [33] Pai T, Hanaki K, Chiou R. Forecasting hourly roadside particulate matter in Taipei County of Taiwan based on first-order and one-variable grey model. *Clean Soil Air Water*, 2013, 41(8): 737-742.
- [34] Wang J, Wu P T, Zhao X N. Soil infiltration based on bp neural network and grey relational analysis. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 2013, 37(1): 97-105.
- [35] Han F L, Yu W B, Zhang X F, et al. Parameter sensitivity analyses of influence on thermal regime of embankment in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 166: 1-10.

102817. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102817.
- [36] Wang Q, Lv W, Li B W, et al. Annual ecosystem respiration is resistant to changes in freeze-thaw periods in semi-arid permafrost. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2630-2641.
- [37] Chang Xiaoli, Jin Huijun, Wang Yongping, et al. Influences of vegetation on permafrost: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7981-7990. [常晓丽, 金会军, 王永平, 等. 植被对多年冻土的影响研究进展. 生态学报, 2012, 32(24): 7981-7990.]
- [38] Guo Dongxin, Huang Yizhi, Wang Jiacheng, et al. Function of geologic structure in the formation of permafrost conditions in Huola River Basin, north Da Hinggan Ling. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11(3): 215-222. [郭东信, 黄以职, 王家澄, 等. 大兴安岭北部霍拉河盆地地质构造在冻土形成中的作用. 冰川冻土, 1989, 11(3): 215-222.]
- [39] Wang Xin, Jin Rui, Du Peijun, et al. Trend of surface freeze-thaw cycles and vegetation green-up date and their response to climate change on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(3): 508-520. [王欣, 晋锐, 杜培军, 等. 青藏高原地表冻融循环与植被返青期的变化趋势及其气候响应特征. 遥感学报, 2018, 22(3): 508-520.]
- [40] Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi, et al. Features of permafrost degradation in Hinggan Mountains, Northeastern China. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 223-228. [金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 兴安岭多年冻土退化特征. 地理科学, 2009, 29(2): 223-228.]
- [41] Jin Huijun, Yu Shaopeng, Lü Lanzhi, et al. Degradation of permafrost in the Da and Xiao Hinggan Mountains, Northeast China, and preliminary assessment of its trend. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 467-476. [金会军, 于少鹏, 吕兰芝, 等. 小大兴安岭多年冻土退化及其趋势初步评估. 冰川冻土, 2006, 28(4): 467-476.]
- [42] He Ruixia, Jin Huijun, Wang Shaoling, et al. Analysis on the current situation of ecological environment in the cold area along the China-Russia pipeline//Genuine Chinese Society for Environmental Sciences Annual Conference Proceedings. Shanghai: China Environmental Science Press, 2010: 863-868. [何瑞霞, 金会军, 王绍令, 等. 中俄管道沿线寒区生态环境现状分析//中国环境科学学会学术年会论文集. 上海: 中国环境科学出版社, 2010: 863-868.]
- [43] Bartalev S A, Belward A S, Erchov D V, et al. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(9): 1977-1982.
- [44] Luo D L, Wu Q B, Jin H J, et al. Recent changes in the active layer thickness across the northern hemisphere. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7): 555. DOI: 10.1007/s12665-015-5229-2.
- [45] Jiang Fengqing, Hu Ruji, Li Zhen. Variation trends of the freezing and thawing index along the Qinghai-Xizang Railway for the period 1966-2004. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9): 935-945. [姜逢清, 胡汝骥, 李珍. 青藏铁路沿线1966—2004年冻结与融化指数的变化趋势. 地理学报, 2007, 62(9): 935-945.]
- [46] Wang Genxu, Wu Qingbai, Wang Yibo, et al. The impacts of railroad engineering on the alpine grassland ecosystem in the Qinghai-Tibet Plateau. *Science and Technology Review*, 2005, 23(1): 8-13. [王根绪, 吴青柏, 王一博, 等. 青藏铁路工程对高寒草地生态系统的影响. 科技导报, 2005, 23(1): 8-13.]

Spatial and temporal variations of frozen ground and its vegetation response in the eastern segment of China-Mongolia-Russia economic corridor from 2000 to 2015

LIU Zhenhai¹, WANG Shaoqiang^{1,2,3}, CHEN Bin²

(1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The eastern segment of the China-Mongolia-Russia economic corridor is situated in the overlap region of the southeast margin of Eurasia permafrost region and the southern border of the tree line, where fragile frozen ground and ecosystems have been maintained. In this study, we analyzed the spatiotemporal distribution and annual change of frozen ground, leaf area index (LAI), and the vegetation green-up data in the eastern China-Mongolia-Russia economic corridor from 2000 to 2015 based on the MERRA-Land data product, GLOBMAP LAI, and MODIS EVI dataset. The main controlling environmental factors of the green-up date and the status of vegetation growth in the different periods over a year were calculated by grey correlation analysis, and then the response of vegetation growth in typical areas to the freezing-thawing changes of the frozen ground was analyzed. Some conclusions can be drawn as follows. (1) In the past 16 years, permafrost and seasonal frost in the eastern China-Mongolia-Russia economic corridor was persistently and significantly degraded, which was mainly reflected by the early thawing and delayed freezing of the frozen ground in time, and manifested as the disappearance of permafrost and the uplift of the lower limit of seasonal frost in the southern isolated permafrost, and the thickening of the active layer in the southern continuous permafrost in space. (2) In about 48% of forest areas, the onset day of frozen ground melting is the main factor affecting the start of vegetation greening season. The growth situation of vegetation in forest areas is altered by the soil water from thawing frozen ground and the hydrothermal mechanisms of peatland. (3) With the transition from forest and peatland to meadow or farmland, the frozen ground degrades and in turn further facilitates the fade of peatland. Exploring the synergetic relationship between the degradation of frozen ground and the ecological environment is helpful to identify the vulnerable regions of degrading frozen ground and the sensitive regions of the ecological environment under the influence of climate warming and human activities.

Keywords: eastern China-Mongolia-Russia economic corridor; ground freeze-thawing process; vegetation growth; gray correlation analysis