

文章编号: 1008-2786-(2020)2-252-13

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000507

1982—2015 年“一带一路”地区 NDVI 时空 演变规律及其影响因素

杨钰杰^{1,2,3}, 白晓永^{2,4*}, 谭秋¹, 罗光杰⁵, 田诗琪^{1,2}

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025;

2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

3. 中国科学院地球化学研究所 普定喀斯特研究综合试验站, 贵州 安顺 562100;

4. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061;

5. 贵州师范学院 贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵阳 550018)

摘 要: 植被的生长状态、变化过程及其驱动因素具有显著的区域差异性, 开展相关研究对于改善生态环境具有重要意义。然而, 目前对于“一带一路”的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的认识仍不清晰, 可能会影响到生态环境改善和绿色“一带一路”建设。为此, 本研究采用 Theil-Sen 中值趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验、偏相关分析和残差分析等方法探讨了 1982—2015 年该区域 NDVI 在像元上的时空演变规律及其影响因素。结果表明: (1) 东南亚为植被覆盖度最高的区域, 有 76% 的地区 NDVI 值在 0.68 以上; NDVI 值低于 0.27 的低植被覆盖区则主要为西亚、中亚的大部分和中国西北等干旱半干旱地区及俄罗斯北部等高纬度地带; (2) 研究区 NDVI 总体以 $5.39 \times 10^{-4}/a$ 的速率增加 ($R^2 = 0.611, p < 0.0001$)。NDVI 显著增加, 即植被显著改善的区域占 37.67%, 包括欧洲西部、勒拿河下游、印度大部分和中国南方地区; NDVI 显著降低, 即植被显著退化的区域包括中西伯利亚高原、东北平原、中亚的里海和咸海周边地区, 面积仅占 8.02%, 显著改善区域面积是显著退化区域面积的 4.70 倍; 此外植被呈现轻微变化和基本不变的区域共占 54.31%; (3) 植被同时受降雨、温度和人为活动这三个因素共同影响的区域较少, 降雨主控区域主要分布在亚洲中部干旱半干旱区以及热带地区, 温度主控区域在欧洲、西亚、青藏高原和俄罗斯北部的分布较广, 典型的人为主控区域则分布在俄罗斯中部、印度北部和中国南方沿海地区。本研究结果可以为“一带一路”地区植被保护与生态建设提供科学决策的理论依据。

关键词: “一带一路”; NDVI; 变化趋势; 影响因素

中图分类号: K903

文献标志码: A

植被在生态系统的物质循环和能量流动中发挥着关键作用, 是生态系统的主体^[1-2], 也是重要的碳库和气候变化的指示器^[3-5], 分析植被的变化趋势, 探究其与气象因子的响应机制, 对植被资源与生态

环境的保护和可持续发展具有重要意义。“一带一路”及其沿线国家和地区是人类命运共同体建设的关键区域, 明晰其植被动态及影响因素对于保护植被、改善生态环境和推动绿色“一带一路”的发展至

收稿日期 (Received date): 2019-06-10; **改回日期** (Accepted date): 2020-04-13

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划(2016YFC0502102, 2016YFC0502300); 西部之光人才计划(A类)([2018]99号); 贵州社会发展科技攻关计划(2017-2966)。[National Key Research Program of China (2016YFC0502102, 2016YFC0502300); Western Light Talent Program (Category A) (2018-99); Science and Technology Plan of Guizhou Province of China (2017-2966)]

作者简介 (Biography): 杨钰杰(1995-), 女, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 遥感生态环境。[YANG Yujie (1995-), female, born in Luzhou, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on Remote sensing ecological environment] E-mail: yyyangyujie@126.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 白晓永(1978-), 男, 河北石家庄人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 喀斯特遥感反演与全球变化。[BAI Xiaoyong (1978-), male, born in Shijiazhuang, Hebei province, Ph. D., professor, research on karst remote sensing inversion and global change] E-mail: baixiaoyong@vip.skleg.cn

关重要^[5]。一些学者开展了相关研究工作,并取得了初步成果。在空间分布方面,有学者利用 2014 年的植被类型数据^[6]和 2015 年的叶面积指数数据^[7]研究发现“一带一路”地区植被的分布具有空间异质性。在动态变化方面,利用 NDVI 数据发现“一带一路”的重点区域——“中亚干旱区”的植被在 1982—2013 年的变化趋势以增加为主^[8]; NDVI 数据分析结果也显示近 30 年来中国的植被呈现增加的趋势^[4, 9-10];也有学者研究了“一带一路”沿线的其他一些地区的植被变化^[11-13]。在影响因素方面,有学者采用 1982—2015 年的 NDVI 数据分析了“一带一路”地区植被对降水的响应关系,发现在春、夏两季时中亚干旱半干旱地区的植被对降水依赖较强^[14]。

以上研究各具特色,但存在一些局限:目前关于“一带一路”地区植被变化趋势及其影响因素的研究总体较少,且已有研究大多是静态的^[6-7]、小区域的^[8-13],对植被的影响因素也局限于对单一的影响因子的研究^[14],缺乏整体性的研究,导致该区域内植被长时间序列上的演化趋势及其影响因素等情况尚不明晰,影响了沿线国家和地区的生态环境保护 and 可持续发展的建设进程。

基于此,本文拟采用“一带一路”地区 1982—2015 年 NDVI 数据,结合降雨、温度和土地利用类型等数据,利用基于像元的 Theil-Sen 中值趋势分析和

Mann-Kendall 显著性检验、偏相关分析和残差分析等方法研究过去 34 年该区域内植被的时空演变特征及其与温度、降雨和土地利用类型变化的关系,探讨研究区植被的空间分布特征和潜在变化规律,明晰其驱动机制,识别植被退化区和改善区,诊断 NDVI 的主控因素并进行分区,为“一带一路”地区植被资源的保护、植被—气候系统相互作用机制和生态环境的改善提供更加科学的理论支撑。

1 研究区概况

《一带一路愿景和行动》指出,“一带一路”不是一个封闭的体系,没有一个绝对的边界,也就是说,没有办法在地图上准确表达其空间范围^[15],没有给出具体范围和国家清单,而是指出“一带一路”贯穿欧亚非大陆^[16]。因此,本文以《2017 一带一路高峰论坛》中提到的“一带一路包含哪些国家”中的中国、蒙古、中亚 5 国、南亚 8 国、西亚 18 国、东盟 10 国、独联体 7 国和中东欧 16 国共 65 个国家为研究区(图 1)。根据《全球生态环境遥感监测 2017 年度报告》——“一带一路”生态环境状况的报告可知,研究区内地带性气候资源禀赋差异悬殊,生态系统结构与生产力差异明显,东南亚、俄罗斯、欧洲以森林生态系统类型为主,中亚以草地和荒漠生态系统类型为主,南亚以农田生态系统类型为主,东亚农



图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

田、森林、草地和荒漠生态系统类型占比相对均衡^[17]。区域水分收支空间分布不均,干旱区农业生产用水与生态用水之间矛盾突出,导致局部生态环境退化。该区气候类型复杂,以季风—干旱典型气候系统为主,下垫面情况复杂多样,具有敏感性和脆弱性^[7]。

2 数据和方法

2.1 数据来源

NDVI 对植被的生物物理特征十分敏感,是常用的植被生长及覆盖度情况的指示因子^[18-22],且 NDVI 数据的时间序列较长,目前已被国内外学者广泛应用到各种尺度的研究中^[23-24]。因此,本文采用 NDVI 数据表征植被覆盖情况来进行深入分析。文中所用的“一带一路”NDVI 数据和全球 NDVI 数据均来自搭载在 NOAA 卫星上的 AVHRR 传感器获取的产品数据——GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) NDVI 3g v1 数据集,与 GIMMS NDVI 3g v0 数据集相比,该数据集已经过校正,减小了人为因素带来的误差(特别是 2006 年之后校准的变化导致 NDVI 值降低的问题),可用于反映植被的长时间序列变化^[9,25],其空间分辨率为 $0.0833^\circ \times 0.0833^\circ$,时间分辨率为 15 天,时间序列跨度是 1981 年 7 月到 2015 年 12 月,本文研究的时间尺度为 1982 年 1 月到 2015 年 12 月,并应用最大值合成法(MVC)来合成每月数据和年数据,消除由大气条件引起的偏差^[26]。

气象数据来自东英吉利大学气候研究中心 (Climate Research Unit, CRU) 发布的 CRU TS 4.00 数据集^[27],空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,本文所选用的数据为 1982—2015 年的温度和降雨数据。土地利用分类数据来自欧空局 CCI-LC 项目 (Climate Change Initiative Land Cover Project) 发布的 300 m 空间分辨率的土地覆被数据,本文选用了 1995—2015 年的数据。由于数据的分辨率不统一,本文将所有数据重采样到与 NDVI 数据相同的分辨率 (即 $0.0833^\circ \times 0.0833^\circ$) 进行研究。

2.2 方法

2.2.1 Theil-Sen 中值趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验

Theil-Sen 中值趋势分析法是一种稳健的非参

数统计的趋势方法,可用于反映 NDVI 的变化趋势^[28-29]。其公式如下:

$$S_{\text{NDVI}} = \text{Median} \left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i} \right) \quad 1982 \leq i \leq j \leq 2015 \quad (1)$$

式中, S_{NDVI} 为 $n(n-1)/2$ 个数据组合的斜率的中位数; NDVI_i 和 NDVI_j 分别为第 i 年和第 j 年的像元 NDVI 平均值 ($1982 \leq i \leq j \leq 2015$)。当 $S_{\text{NDVI}} > 0$ 时,表明在研究时段内 NDVI 呈现增加趋势;反之,则为退化的趋势。

Mann-Kendall 是一种非参数检验方法,它不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值干扰,适合用于判断时间序列数据是否具有上升或下降的趋势^[8, 30-32]。计算公式如下:

设定 $\{\text{NDVI}_i\}$, $i = 1982, 1983, \dots, 2015$, 定义 Z 统计量为:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

式中, n 为年份长度; sgn 为符号函数。本文在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 上判断 NDVI 变化趋势的显著性。

2.2.2 偏相关分析

在一个多因素系统中,在不考虑其他因素的影响下研究一个因素与另一个因素的相关性时,这种相关性称为偏相关^[19, 33]。偏相关系数用来表示多个因素动态变化之间的相关性,本文利用该方法分析基于像元的 1982—2015 年 NDVI 与年均温度和年累积降雨量之间的相关性。首先分别计算各要素的相关关系,再计算偏相关关系,NDVI 与其影响因子的相关系数计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, r_{xy} 为变量 x 和 y 的相关系数; x_i 为第 i 年的 NDVI; y_i 为第 i 年的累积降雨量或平均温度; \bar{x} 为研究时段内 NDVI 的平均值; \bar{y} 为研究时段内年累积降雨或温度的平均值。

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1 - r_{ac}^2) + (1 - r_{bc}^2)}} \quad (7)$$

式中, $r_{ab,c}$ 表示去除变量 c 影响后, 变量 a 和变量 b 的偏相关系数; r_{ab} 、 r_{ac} 、 r_{bc} 分别表示变量 a 与变量 b 、变量 a 与变量 c 、变量 b 和变量 c 之间的相关关系。利用 t 检验法对偏相关系数的显著性进行检验, 本研究中取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 在显著性水平以上的区域则为显著相关区域。

2.2.3 残差分析

根据残差分析法可将长时间序列 NDVI 变化中的自然因素和人类活动因素的影响区分开来, 它的原理是通过建立 NDVI 与气候因素的回归模型, 预测像元上温度和降雨对 NDVI 的贡献, 在不考虑其他非决定性因素影响的情况下, NDVI 实测值与 NDVI 模拟值之间的残差, 即为人类活动所贡献的部分^[34-36], 计算公式如下:

$$\sigma = \text{NDVI}_a - \text{NDVI}_p \quad (8)$$

$$\text{NDVI}_p = x \times P + y \times T + z \quad (9)$$

式中, σ 为实测值 NDVI_a 和预测值 NDVI_p 之间的残差; x 和 y 分别为降雨 P 和温度 T 的回归系数; z 为常数。

3 结果

3.1 “一带一路”地区植被时空分布特点

从空间上看, “一带一路”地区 NDVI 的空间分布具有明显差异。研究区 NDVI 值为 $-0.3 \sim 0.9$, 根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007), 将植被覆盖度分为: 无植被覆盖区/水体和冰雪覆盖区 ($\text{NDVI} < 0$)、低植被覆盖区 ($0 < \text{NDVI} < 30\%$, 即 $0 < \text{NDVI} < 0.27$)、中低植被覆盖度地区 ($30\% < \text{NDVI} < 45\%$, 即 $0.27 < \text{NDVI} < 0.41$)、中植被覆盖度地区 ($45\% < \text{NDVI} < 60\%$, 即 $0.41 < \text{NDVI} < 0.54$)、中高植被覆盖度地区 ($60\% < \text{NDVI} < 75\%$, 即 $0.54 < \text{NDVI} < 0.68$) 和高植被覆盖度地区 ($\text{NDVI} > 75\%$, 即 $\text{NDVI} > 0.68$)^[11,37-38]。水体、高海拔和高纬度冰雪覆盖地区是无植被覆盖区; 低植被覆盖区分布在俄罗斯北部、中亚、西亚和蒙古地区; 中低植被覆盖度分布在俄罗斯中部、中国东北、印度西部和欧洲东部; 中植被覆盖度地区在俄罗斯南部、欧洲中部和印度东北部; 中高植被覆盖度地区大部分在欧洲西部和中国南方地区; 东南亚是研究区内植被覆盖度最高的地区, 区域内有 76% 的地区 NDVI 值超过 0.68 (图 2)。

从时间上看, 1982—2015 年, “一带一路”地区 NDVI 平均值在 $0.3028 \sim 0.3285$ 波动, 34 年来“一带一路”地区 NDVI 年平均值总体趋势是以 $5.39 \times 10^{-4}/\text{a}$ 的速率显著增加 ($R^2 = 0.611$, $p < 0.0001$) (图 3a), 高于全球 NDVI 年平均值的增加速率

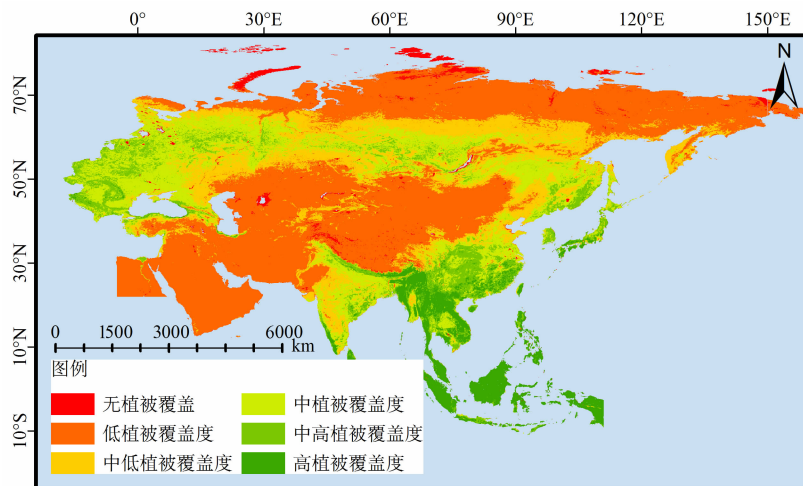


图2 研究区 NDVI 空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of NDVI in study area

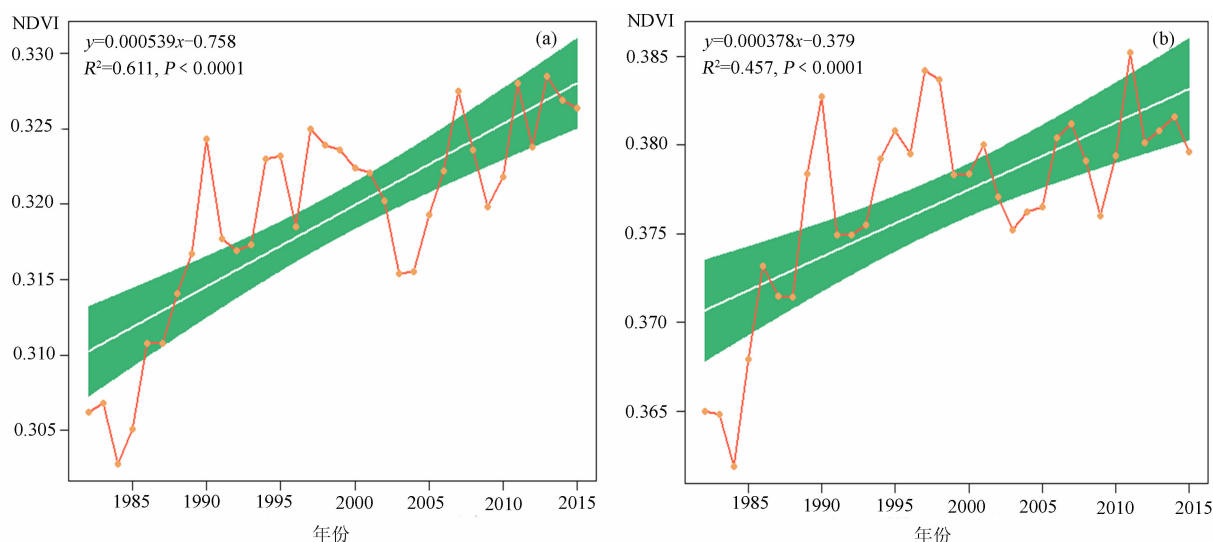


图3 “一带一路”地区(a)与全球(b)植被年际变化趋势

Fig. 3 Interannual variation trend of vegetation in the “Belt and Road” area (a) and Global (b)

($3.78 \times 10^{-4}/a$) (图3b)。

3.2 “一带一路”地区植被变化趋势

本文利用 Theil-Sen 中值趋势分析方法研究“一带一路”地区植被的变化趋势,使用 Mann-Kendall 方法对变化趋势进行显著性检验。参考前人的研究^[8, 32],并在综合考虑研究区 S_{NDVI} 基本上符合正态分布现象的基础上,将 $S_{NDVI} \leq -0.0005$ 划分为退化区域,将 $-0.0005 < S_{NDVI} < 0.0005$ 的区域划分为基本不变区域,将 $S_{NDVI} \geq 0.0005$ 划分为改善区域。将 Mann-Kendall 检验结果 $Z \leq -1.96$ 和 $Z \geq 1.96$ 的区域划分为显著变化区域,将 $-1.96 < Z < 1.96$ 划分为不显著变化区域(显著性水平 $\alpha = 0.05$)。由于 Theil-Sen 值为 $-0.0005 \sim 0.0005$, Mann-Kendall 检验值 $Z \geq 1.96$ 或 $Z \leq -1.96$ 的区域面积很小,本文将这类区域归类到基本不变这一类型中。结果表明,研究区内植被显著退化(即 NDVI 显著降低)区域的面积为 410.14 万 km^2 ,占到研究区面积的 8.02%,主要包括中西伯利亚高原、东北平原和中亚的里海和咸海周边地区。植被显著改善(即 NDVI 显著增加)区域的面积高达 1925.65 万 km^2 ,占 37.67%,主要分布在欧洲、小亚细亚半岛、勒拿河下游、印度和中国南方地区。西亚和中国西北大部分地区的植被表现出基本不变的趋势,面积达 2314.68 万 km^2 ,占 45.28%。呈现轻微变化趋势的面积占 9.02%。总体来看,“一带一路”地区植被显著改善区域面积是显著退

化区域面积的 4.70 倍,植被改善趋势十分显著(图4、表1)。

3.3 “一带一路”地区植被变化影响因素分析

3.3.1 温度和降雨对植被的影响

本文利用偏相关分析法对研究区 NDVI 与降雨和温度的偏相关关系进行分析,并利用 t 检验法对其显著性进行检验。结果表明 1982—2015 年“一带一路”地区 NDVI 和降雨的偏相关系数为 $-0.85 \sim 0.88$,二者呈显著正相关的区域占 11.48%,主要分布在黑海北岸、伊朗高原、印度西北部和蒙古高原地区,区域内的降雨普遍呈现下降的趋势(图5a),表明这些地区植被受到降雨下降的影响而退化。呈现显著负相关关系的区域占 4.54%,主要分布在中西伯利亚高原的西部等高纬度地区,这些区域降雨在上升,但植被呈现出退化的趋势,表明这些区域降雨的变化并没有对植被的变化起到主控作用(图5c、图5e)。

“一带一路”地区温度和 NDVI 的偏相关系数为 $-0.93 \sim 0.94$, 34.02% 的区域温度和 NDVI 呈显著正相关关系,主要分布在欧洲大部分、俄罗斯北部、黑海和里海南部、中国南方和日本地区,这些地区的温度和植被都普遍呈现出上升的趋势(图4、图5b)表明在这些中高纬度地区温度的上升是促进植被增加的重要因素。温度和 NDVI 呈现显著负相关关系的区域占 2.85%,主要分布在阿拉伯半岛和里海北部等地区。这些地区虽然温度普遍上升,但植被却

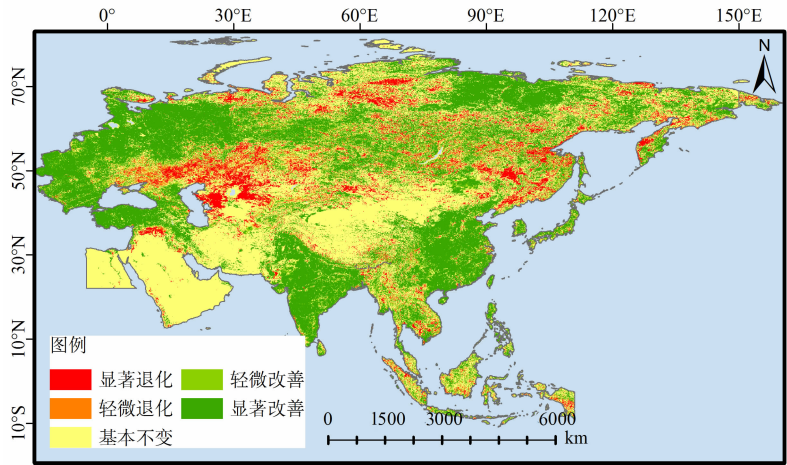


图 4 基于像元的“一带一路”地区植被变化趋势
Fig.4 Vegetation change trend in the study area based on pixels

表 1 植被变化趋势分布情况
Tab.1 Distribution of vegetation change trend grade

Theil-Sen	MK 显著性检验	变化程度等级	面积/km ²	百分比/%
$S \leq -0.0005$	$Z \leq -1.96$	显著退化	410.14×10^4	8.02
$S \leq -0.0005$	$-1.96 < Z < 1.96$	轻微退化	180.03×10^4	3.52
$-0.0005 < S < 0.0005$	$-1.96 < Z < 1.96$	基本不变	2314.68×10^4	45.28
$S \geq 0.0005$	$-1.96 < Z < 1.96$	轻微改善	281.41×10^4	5.50
$S \geq 0.0005$	$Z \geq 1.96$	显著改善	1925.65×10^4	37.67

呈现出退化或基本不变的趋势,结合前文分析得知,在这样的干旱地区,降雨更有可能成为植被变化的主控因素(图 5d、图 5f)。

3.3.2 人为因素对“一带一路”地区植被的影响

本文引入残差分析法来量化人类活动对植被的影响,选取降雨和温度为自变量在 MATLAB 中对 NDVI 进行残差分析,得到 1982—2015 年“一带一路”地区的残差趋势分布图(图 6)。残差值趋于零则表明该区域植被生长与降雨和温度相关性明显,而受人类活动影响小;残差的绝对值越大表明这些区域植被的生长演化受人类活动影响越大,正值表明植被生长受人类活动干扰趋于改善,负值反映植被生长受人类干扰区域退化。

图 6 显示,1982—2015 年,“一带一路”地区植被改善受人为因素影响最大(残差值 > 0.001)的区域占 18.24%,主要分布在欧洲东北部大部分地区、小亚细亚半岛、印度和中国南方;在这些区域的周边植被改善受人为因素相对较小(残差值 $0.0005 \sim$

0.001),占 15.25%;中亚和中国的东北地区分布着植被退化受人为因素影响最大(残差值 < -0.001)的区域,占 3.66%;其周边的植被退化受人为因素影响相对较小(残差值 $-0.001 \sim -0.0005$),占 7.28%。还有 55.57% 的地区的植被变化受人为因素影响最小(残差值 $-0.0005 \sim 0.0005$),主要分布在西亚大部分地区、中国西北以及俄罗斯北部和东部,这些地区的植被更易受降雨和温度的影响。

3.3.3 影响植被变化的主控因子分区

根据上文所判断的 NDVI 与人为因素、降雨和温度呈现显著相关关系的区域,本研究对“一带一路”地区植被变化的主控因素进行分区(图 7)。NDVI 与三个因素的关系均显著的区域被划分为共同影响区域,这类区域分布较少,主要是在印度西北的沙漠地区和蒙古高原的东部。NDVI 与人为因素和温度因素不显著,而与降雨显著的区域被判定为降雨主控区域,这部分区域主要包括蒙古和中亚等干旱半干旱区以及东南亚地区,在这些地区恢复植

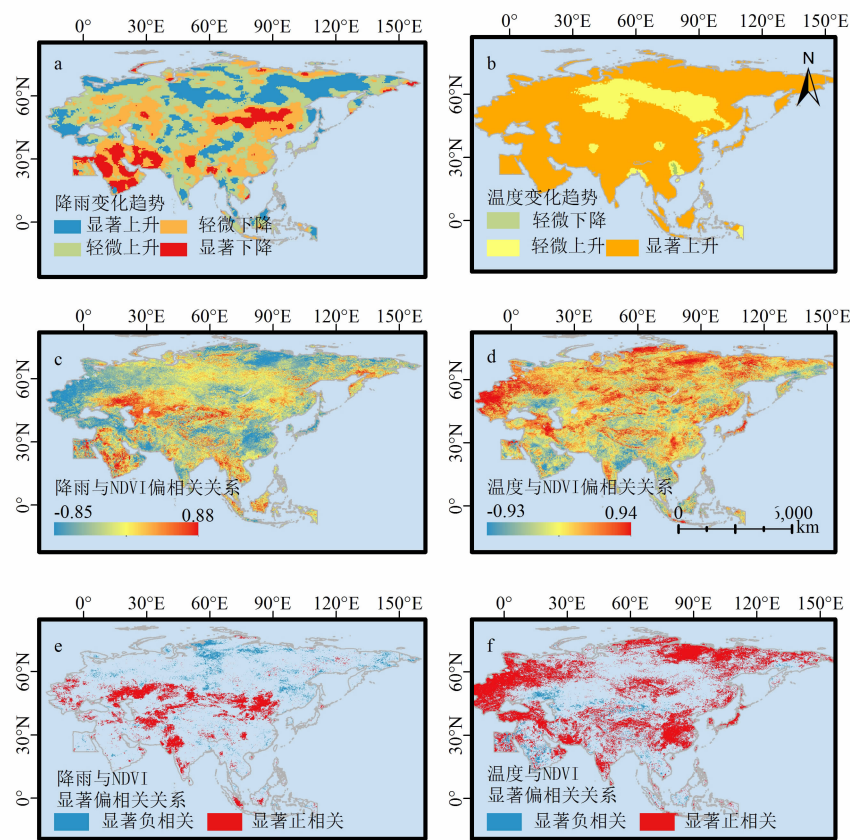


图 5 研究区降雨(a)和温度(b)分布情况、NDVI与降雨(e)和温度(f)的偏相关关系的偏相关关系、通过显著性水平 0.05 检验的降雨(e)和温度(f)与 NDVI 偏相关系数

Fig. 5 Evolution trend of rainfall (a) and temperature (b) in the study area, partial correlation between NDVI with the rainfall (c) and temperature (d), partial correlation coefficient between rainfall (e), temperature (f) with NDVI over the significance level of 0.05

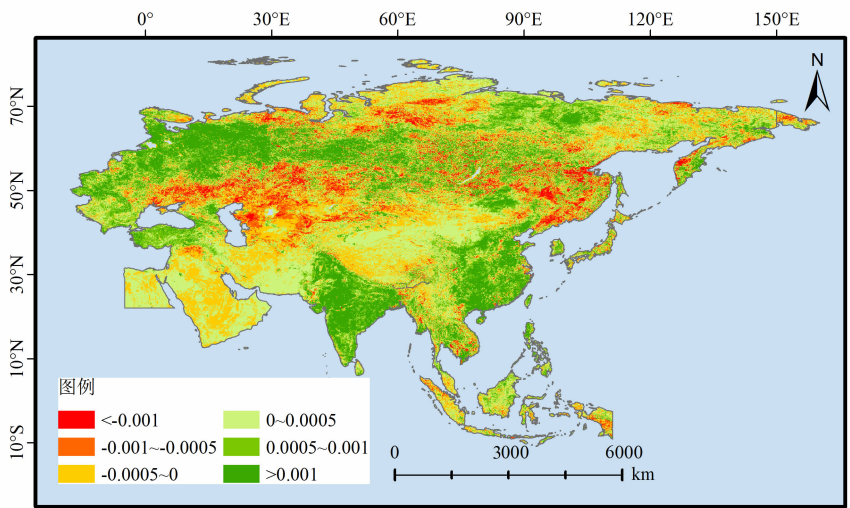


图 6 “一带一路”地区 1982—2015 残差变化趋势图

Fig. 6 The residual variation trend from 1982 to 2015 in the study area

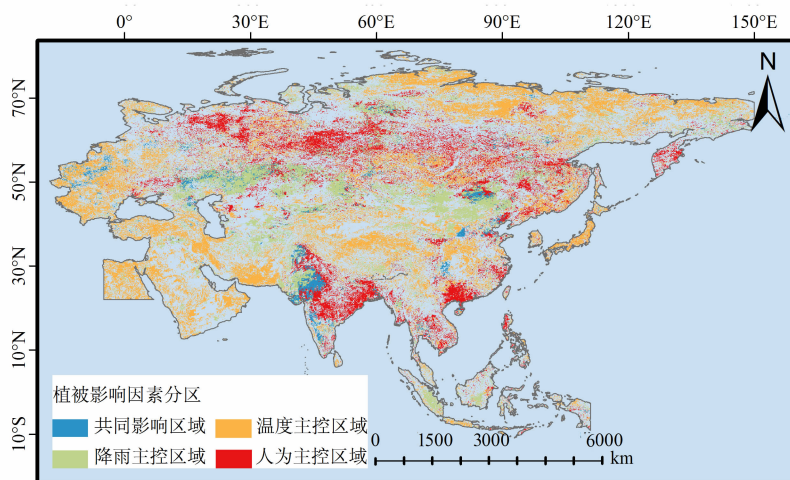


图7 “一带一路”地区 NDVI 主控因素分区

Fig. 7 Zoning the main controlled factors of NDVI in the study area

被应以保护水资源、发展水利设施等为基础。NDVI 与人为因素和降雨因素不显著,而与温度显著的区域被判定为温度主控区域,这类区域在欧洲、西亚、青藏高原和俄罗斯北部的分布较广,在全球气候变暖的背景下这些区域的植被可能会有持续改善的趋势。NDVI 与温度和降雨因素不显著、与人为因素显著的地区则划分为人为主控区域,这类区域主要包括俄罗斯中部、印度北部和中国南方沿海地区。在人为因素主控的区域,应通过对土地资源进行合理规划和利用促进植被的改善,如实施生态工程等。

4 讨论

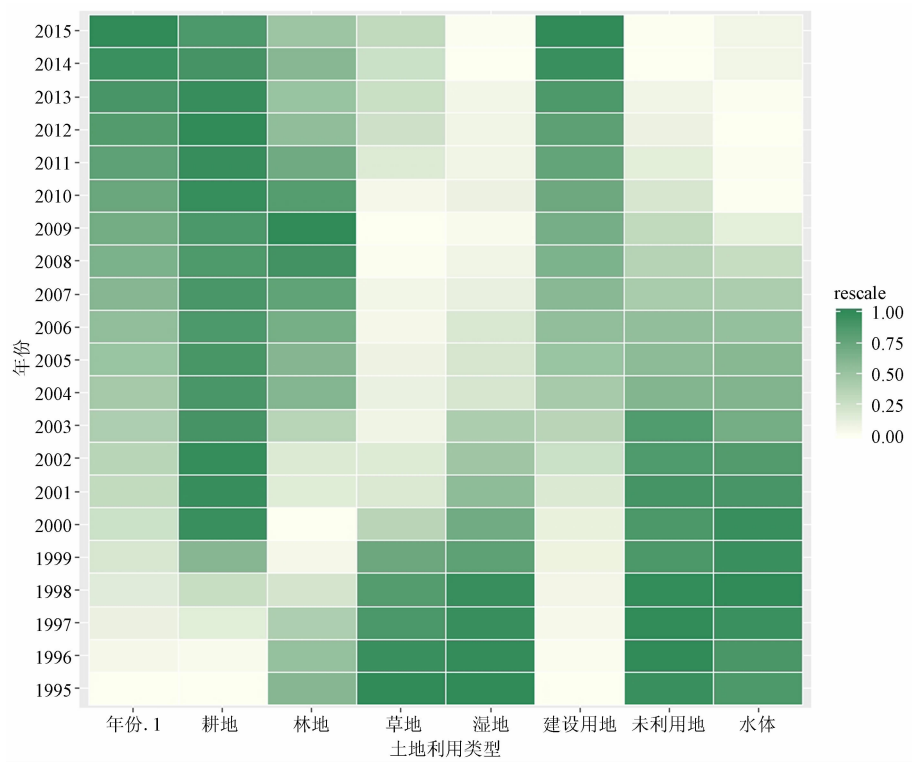
4.1 生态恢复工程对植被的影响

人为因素主控区域实施生态工程等措施是促进植被改善的重要手段,这一方法在我国已得到了实践证实。相关研究表明,中国各防护林地区历年累积造林面积与植被覆盖度均有所增加^[4],中国第八次全国森林资源清查数据显示中国防护林地区森林蓄积量达 79.5 亿 m^3 , 占总蓄积量的 52.5%^[39-40]。中国五大防护林工程区内植被退化的区域均未超过 10%, 太行山防护林、沿海防护林和长江中上游防护林内超过 50% 区域的植被都呈现出显著改善的趋势(表 2)。“一带一路”区域内其他的国家也有成功的生态恢复工程案例,如日本的兵库县淡路岛“故乡之森”工程,在实施期 1994—1997 年,平均材

积量由 10 cm^3 上升到 2389.3 cm^3 , 平均树高由 40 cm 上升到 185.4 cm^[41]。可见,生态恢复工程的实施在增加植被覆盖、促进生态环境改善和可持续发展等方面发挥了极大的作用^[42]。

4.2 土地利用变化对植被的影响

在人类活动对植被的影响因素中,除前文所述的建设生态保护工程外,土地利用类型变化的影响也不容忽视。本文根据国家标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),结合研究区土地利用实际分布情况以及数据本身的特点,参考相关分类^[43],将 CCI-LC 土地利用类型数据归为耕地、林地、草地、湿地、建设用地、未利用地和水体共 7 类。以研究区 1995—2015 年中每年各类土地利用的面积为基础,利用 R 语言中的“ggplot2”程序包中的“ggplot”函数绘制热图,分析研究区内各类土地利用随着年份的变化情况,土地利用面积增加,颜色越深(图 8)。结果显示耕地面积波动上升,林地面积先增加后减少,草地、湿地、未利用地和水体的面积持续减少,建设用地的面积持续增加。从上文得知研究区植被改善趋势显著,可见研究区内耕地面积的增加对植被的增加有较大贡献,这与有关研究中指出的中国新增改善面积的 42% 来自于植树造林,32% 来自农业,印度新增改善面积则主要来自农业,占比达 82% 的结论相一致^[44]。建设用地的面积持续增加可能是林地面积的减少的原因,同时也可能是草地、湿地、未利用地和水体面积的减少的原因。



注:图例“rescale”表示把数据标准化到 0 ~ 1 后进行分析,横坐标轴标签上的“年份.1”表示在作图时利用年份将数据进行排序。

图 8 1995—2015 年“一带一路”地区土地利用类型变化情况

Fig. 8 Land use change in the study area from 1995 to 2015

表 2 中国防护林工程地区植被变化趋势等级面积占比

Tab. 2 Area ratio of vegetation change trend in China's shelterbelt project region

防护林名称	面积/km ²	各变化趋势等级面积占比/%				
		显著退化	轻微退化	基本不变	轻微改善	显著改善
农田防护林	86.17 × 10 ⁴	6.78	1.48	40.98	3.49	47.27
“三北”防护林	393.75 × 10 ⁴	6.32	1.08	66.38	1.86	24.35
太行山防护林	9.94 × 10 ⁴	1.73	0.38	11.67	4.99	81.23
沿海防护林	56.26 × 10 ⁴	5.59	2.13	19.55	6.08	66.64
长江中上游防护林	144.73 × 10 ⁴	1.90	1.66	19.84	7.49	69.12

4.3 不足和展望

遥感数据本身可能存在误差,应对数据进行验证和提高精度的预处理。降雨和温度对植被的影响在月尺度上的关系会比较敏感。在未来工作中,分析植被与气候因素在月尺度上的关系很有必要。除本文探讨到的影响因子(降雨量、温度和土地利用变化等)以外,植被的生长演变受其他自然因素(如大气 CO₂ 浓度、大气氮沉降、蒸散发等)和人类活动的影响也有待进一步研究。

5 结论

本文利用“一带一路”地区 1982—2015 年 NDVI 数据,对植被空间分布和演变趋势进行研究,结合 Theil-Sen 中值趋势分析和 Mann-Kendall 检验、残差分析和偏相关分析法分析了植被空间分布和演变趋势、植被演化与降雨量和温度的关系,以及人类活动对植被演化的影响。得出如下结论:

(1) 植被覆盖存在明显的空间差异性, 东南亚76%的地区NDVI值在0.68以上, 是植被覆盖度最高的区域; NDVI值低于0.27的低植被覆盖区则主要包括西亚、中亚的大部分及中国西北等干旱半干旱地区和俄罗斯北部等高纬度地带。

(2) “一带一路”地区植被改善十分显著, NDVI增加的速率为 $5.39 \times 10^{-4}/a$ ($R^2 = 0.611$, $p < 0.0001$), 植被显著改善的区域占37.67%, 显著退化的区域占8.02%, 轻微变化和基本不变的区域占54.31%, 显著改善的面积是显著退化面积的4.70倍。

(3) 残差分析表明1982—2015年“一带一路”地区植被改善受人类活动影响最大的区域占18.24%, 植被退化受人类干扰最大的区域占3.66%, 还有22.53%区域的植被变化受人类活动影响相对较小, 植被变化受人类活动影响最小区域面积占55.57%。

(4) 降雨和NDVI的偏相关分析结果表明呈显著正相关的区域占11.48%, 呈现显著负相关关系的区域占4.54%。温度和NDVI的偏相关分析结果表明呈显著正相关的区域占34.02%, 呈现显著负相关关系的区域占2.85%。表明该区域的植被变化受温度的影响更大。

(5) 植被同时受三个因素共同影响的区域面积较小, 主要分布在印度西北的沙漠地区和蒙古高原的东部。降雨主控干旱半干旱区以及东南亚地区, 恢复植被应以保护水资源为主。温度主控在欧洲、西亚、青藏高原和俄罗斯北部等高纬度和高海拔地区, 全球气候变暖可能带来这些区域植被的持续改善。人为主控区域应对土地资源进行合理规划和利用以促进植被的改善。

参考文献 (References)

- [1] PIAO Shilong, WANG Xuhui, PARK T J, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **1**(1): 14–27.
- [2] 拉巴, 拉珍, 拉巴卓玛, 等. 2000—2018年那曲市植被NDVI变化及气候变化响应[J]. *山地学报*, 2019, **37**(4): 499–507. [LA Ba, LA Zhen, LABA Zhuoma, et al. NDVI change and its response to climate change in Nag Qu city during 2000–2018 [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(4): 499–507]
- [3] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, **37**(6): 804–812.

- [FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000 [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2007, **50**(9): 1341–1350]
- [4] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. *生态学报*, 2015, **35**(16): 59–70. [LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982–2012 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(16): 59–70]
- [5] 董战峰, 葛察忠, 王金南, 等. “一带一路”绿色发展的战略实施框架[J]. *中国环境管理*, 2016, **8**(2): 31–35, 41. [DONG Zhanfeng, GE Chazhong, WANG Jinnan, et al. Strategic implementation framework for the greening development of the Belt and Road initiative [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2016, **8**(2): 31–35, 41]
- [6] 吴绍洪, 刘路路, 刘燕华, 等. “一带一路”陆域地理格局与环境变化风险[J]. *地理学报*, 2018, **73**(7): 1214–1225. [WU Shaohong, LIU Lulu, LIU Yanhua, et al. Geographical patterns and environmental change risks in terrestrial areas of the Belt and Road [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(7): 1214–1225]
- [7] 柳钦火, 吴俊君, 李丽, 等. “一带一路”区域可持续发展生态环境遥感监测[J]. *遥感学报*, 2018, **22**(4): 156–178. [LIU Qinhua, WU Junjun, LI Li, et al. Ecological environment monitoring for sustainable development goals in the Belt and Road region [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(4): 156–178]
- [8] 邓兴耀, 姚俊强, 刘志辉. 基于GIMMS NDVI的中亚干旱区植被覆盖时空变化[J]. *干旱区研究*, 2017, **34**(1): 10–19. [DENG Xingyao, YAO Junqiang, LIU Zhihui. Spatiotemporal dynamic change of vegetation coverage in arid regions in central Asia based on GIMMS NDVI [J]. *Arid Zone Research*, 2017, **34**(1): 10–19]
- [9] 刘可, 杜灵通, 侯静, 等. 近30年中国陆地生态系统NDVI时空变化特征[J]. *生态学报*, 2018, **38**(6): 1885–1896. [LIU Ke, DU Lingtong, HOU Jing, et al. Spatiotemporal variations of NDVI in terrestrial ecosystems in China from 1982–2012 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(6): 1885–1896]
- [10] 李飞, 曾源, 李晓松, 等. 近30年中国陆地植被活动遥感监测[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, **44**(8): 1671–1678. [LI Fei, ZENG Yuan, LI Xiaosong, et al. Remote sensing based monitoring of interannual variations in vegetation activity in China from 1982 to 2009 [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2017, **57**: 1800–1806]
- [11] 陈秀妍, 付碧宏, 时丕龙, 等. 2000—2016年中亚天山植被变化及气候分异研究[J]. *干旱区地理*, 2019, **42**(1): 164–173. [CHEN Xiuyan, FU Bihong, SHI Pilog, et al. Vegetation dynamics in response to climate change in Tianshan, Central Asia from 2000 to 2016 [J]. *Arid Land Geography*, 2019, **42**(1): 164–173]
- [12] LUO Liang, DU Wenpeng, YAN Huimin, et al. Spatio-temporal patterns of vegetation change in Kazakhstan from 1982 to 2015 [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, **8**(4): 378–384.
- [13] 林小惠, 王军邦, 李贵才, 等. 基于MODIS遥感监测的东南亚

- 地区植被动态[J]. 生态学报, 2011, **30**(4): 629–635. [LIN Xiaohui, WANG Junbang, LI Guicai, et al. Vegetation spatiotemporal variation in Southeast Asia based on MODIS remote sensing monitoring [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(4): 629–635]
- [14] 孙立群, 李晴岚, 陈骥, 等. 欧亚大陆不同生态区植被生长对降水响应的季节变化规律[J]. 生态学报, 2018, **38**(22): 8051–8059. [SUN Liqun, LI Qinglan, CHEN Ji, et al. Seasonal changes in vegetation response to precipitation across eco-regions over Eurasia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(22): 8051–8059]
- [15] 国家发展改革委, 外交部, 商务部. 推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动[J]. 交通财会, 2015, (4): 82–87. [NATIONAL Development and Reform Commission, MINISTRY of Foreign Affairs, MINISTRY of Commerce. Vision and action to promote the Silk Road Economic Belt and the 21st Century Maritime Silk Road [J]. Finance & Accounting for Communications, 2015, (4): 82–87]
- [16] 刘卫东. “一带一路”战略的科学内涵与科学问题[J]. 地理科学进展, 2015, **34**(5): 538–544. [LIU Weidong. Scientific understanding of the Belt and Road initiative of China and related research themes [J]. Progress in Geography, 2015, **34**(5): 538–544]
- [17] 王飞, 丁建丽, 魏阳. “一带一路”国家和地区百年尺度干旱化特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, **19**(11): 1442–1455. [WANG Fei, DING Jianli, WEI Yang. Analysis of drought characteristics over countries and regions of “The Belt and Road” in recent one hundred years [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, **19**(11): 1442–1455]
- [18] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation [J]. Remote Sensing of Environment, 1979, **8**: 127–150.
- [19] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(9): 1425–1435. [ZHANG Jinghua, FENG Zhiming, JIANG Luguang, et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2015, **30**(9): 1425–1435]
- [20] TIAN Feng, FENSHOLT R, VERBESSELT J, et al. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, **163**: 326–340.
- [21] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, **70**(5): 705–716. [LIU Xianfeng, PAN Yaoshong, ZHU Xiufang, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(5): 705–716]
- [22] 成方妍, 刘世梁, 尹洁洁, 等. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素[J]. 生态学报, 2017, **37**(3): 788–797. [CHENG Fangyan, LIU Shiliang, YIN Yijie, et al. The dynamics and main driving factors of coastal vegetation in Guangxi based on MODIS NDVI [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(3): 788–797]
- [23] WANG Xuhui, PIAO Shilong, CIAIS P, et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, **108**(4): 1240–1245.
- [24] 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J]. 地理学报, 2015, **70**(5): 717–729. [ZHAO Shuyi, GONG Zhaoning, LIUXuying. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001–2013 [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(5): 717–729]
- [25] ZHOU Liming, TUCKER C J, KAUFMANN R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, **106**(D17): 20069–20083.
- [26] 刘洛, 徐新良, 段建南, 等. 京津风沙源区生态环境时空变化的遥感监测分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, **13**(6): 819–824. [LIU Luo, XU Xinliang, DUAN Jiannan, et al. The spatial-temporal changes monitoring of ecological environment in source area of the sand and dust endangering Beijing-Tianjin by remote sensing [J]. Journal of Geo-Information Science, 2011, **13**(6): 819–824]
- [27] HARRIS I C, JONES P D. CRU CY4.00: Climatic Research Unit (CRU) year-by-year variation of selected climate variables by country (CY) version 4.00 (Jan. 1901–Dec. 2015). Centre for Environmental Data Analysis, 2017.
- [28] LIU Yang, LI Lanhai, CHEN Xi, et al. Temporal-spatial variations and influencing factors of vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI3g [J]. Global and Planetary Change, 2018, **169**: 145–155.
- [29] LI Meng, CHU Ronghao, SHEN Shuanghe, et al. Dynamic analysis of pan evaporation variations in the Huai River Basin, a climate transition zone in eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **625**: 496–509.
- [30] WAKES A, SAUVAGE S, BORBON A, et al. Multi-year levels and trends of non-methane hydrocarbon concentrations observed in ambient air in France [J]. Atmospheric Environment, 2016, **141**: 263–275.
- [31] SONG Xiaoyan, SONG Songbai, SUN Wenyi, et al. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960–2013 [J]. Atmospheric Research, 2015, **157**: 137–152.
- [32] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖

- 的时空变化[J]. 生态学报, 2013, **33**(24): 7798 – 7806.
- [YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(24): 7798 – 7806]
- [33] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 等. 2000—2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(1): 52 – 63. [LUO Min, GULI Jiapaer, GUO Hao, et al. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to hydrothermal condition in the Tarim River Basin from 2000 to 2013 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(1): 52 – 63]
- [34] JIAPAER G, LIANG Shunlin, YI Qiuxiang, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 64 – 76.
- [35] LIU Zhengjia, LIU Yansui, LI Yurui. Anthropogenic contributions dominate trends of vegetation cover change over the farming-pastoral ecotone of northern China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **95**: 370 – 378.
- [36] HERRMANN S M, ANYAMBA A, TUVKER C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate [J]. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2005, **15**(4): 394 – 404.
- [37] 杨恒, 沈润平, 吴立叶, 等. 基于S-G滤波的江西省植被覆盖度时空变化遥感分析[J]. 科学技术与工程, 2014, **14**(22): 101 – 106. [YANG Heng, SHEN Runping, WU Liye, et al. Temporal and spatial analysis of remotely sensed vegetation coverage changes in Jiangxi province based on S-G filter [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**(22): 101 – 106]
- [38] 王静, 周伟奇, 许开鹏, 等. 京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响[J]. 生态学报, 2017, (21): 6 – 16. [WANG Jing, ZHOU Weiqi, XU Kaipeng, et al. Spatiotemporal pattern of vegetation cover and its relationship with urbanization in Beijing-Tianjin-Hebei megaregion from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, (21): 6 – 16]
- [39] 罗细芳, 古育平, 陈火春, 等. 我国沿海防护林体系生态效益价值评估[J]. 华东森林经理, 2013, (1): 25 – 27. [LUO Xifang, GU Yuping, CHEN Huochun, et al. Evaluation of ecological benefit value of coastal shelterbelt system in China [J]. *East China Forest Management*, 2013, (1): 25 – 27]
- [40] 王强恩. 我国防护林体系建设存在的问题及对策[J]. 农业开发与装备, 2017, (9): 63 – 64. [WANG Qiangen. Problems and countermeasures in the construction of China's shelterbelt system [J]. *Agricultural Development and Equipment*, 2017, (9): 63 – 64]
- [41] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. 林业资源管理, 2014, (1): 1 – 2. [NATIONAL Forestry Administration. The eighth national forest resource inventory results [J]. *Forestry Resource Management*, 2014, (1): 1 – 2]
- [42] 李树华. 利用绿化技术进行生态与景观恢复的原理与手法——以日本兵库县淡路岛“故乡之森”的营造为例[J]. 中国园林, 2005, **21**(11): 59 – 64. [LI Shuhua. The principle and method of ecological and landscape restoration using greenery technology — a case study on the construction of Hometown's Forest in Awaji-island, Japan [J]. *LA Engineering*, 2005, **21**(11): 59 – 64]
- [43] SRIKANTA S, SANDEEP B, SHAHID R, et al. Estimating global ecosystem service values and its response to land surface dynamics during 1995 – 2015 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **223**: 115 – 131.
- [44] CHEN Chi, PARK T, WANG Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. *Nature Sustainability*, 2019, **2**: 122 – 129.

Analysis of the Spatiotemporal Evolution of NDVI and Its Influencing Factors in the “Belt and Road” Region from 1982 to 2015

YANG Yujie^{1,2,3}, BAI Xiaoyong^{2,4*}, TAN Qiu¹, LUO Guangjie⁵, TIAN Shiqi^{1,2}

(1. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

3. Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Anshun 562100, Guizhou, China;

4. CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an, 710061, China;

5. Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China)

Abstract: Significant regional differences exist in the growth state, change process and driving factors of vegetation. However, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) of the “Belt and Road” remains under

studied. As a result, the scientific decision-making in the countries along the route and the construction of “community with shared future for mankind” has been affected. Therefore, this study utilized the NDVI data to describe the spatiotemporal evolution characteristics of vegetation and its driving mechanism in the study area through Theil-Sen median trend analysis and Mann-Kendall significance test, partial correlation analysis, and residual analysis. Results showed that, firstly, the region with the highest vegetation coverage, with superior rainfall and heat conditions, is Southeast Asia. NDVI was higher than 0.68 in 76% of the regions in Southeast Asia. Low vegetation coverage areas are mainly located in arid regions, such as West Asia, Central Asia and high latitudes in Northern Russia. Secondly, the average NDVI value in the study area grew at a rate of $5.39 \times 10^{-4}/a$ ($R^2 = 0.611$, $p < 0.0001$). Significant improvement areas are located in Europe, Asia minor peninsula, Lower Lena, India and southern China, and account for 37.67%. Significant decreased areas only account for 8.02%. In addition, slightly changed area and stable area accounts for 54.31%, and the significant improvement areas are 4.70 times that of the significant degraded areas. Thirdly, few areas are affected by these three factors simultaneously. Rainfall-controlled areas are mainly concentrated in arid, semi-arid and tropical regions. Temperature-controlled areas are widely distributed in high latitude and altitude. Human-controlled regions are located in central Russia, northern India and the coastal areas of southern China. The current work clarifies and discusses the spatiotemporal evolution rules and influencing factors of NDVI from 1982 to 2015 in the “Belt and Road” region. Thus, it provides a scientific basis for vegetation protection and ecological construction in this region.

Key words: “Belt and Road”; vegetation; evolution trend; driving factors