

doi: 10.6046/gtzyyg.2019.04.05

引用格式: 王伟, 阿里木·赛买提, 吉力力·阿不都外力. 基于地理探测器模型的中亚 NDVI 时空变化特征及其驱动因子分析 [J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 32–40. (Wang W, Samat A, Abuduwaili J. Geo-detector based spatio-temporal variation characteristics and driving factors analysis of NDVI in Central Asia [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(4): 32–40.)

基于地理探测器模型的中亚 NDVI 时空变化特征及其驱动因子分析

王伟^{1,2,3}, 阿里木·赛买提^{1,3}, 吉力力·阿不都外力^{1,2,3}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 植被是联结大气圈、土壤圈、水圈和生物圈的重要纽带, 因此植被的时空变化特征及其驱动因子之间的关系在区域生态环境变化研究中具有重要意义。基于 GIMMS/NDVI 和 CRU 等多种数据集, 采用趋势分析法和地理探测器模型, 分析了中亚地区 1991—2015 年间 NDVI 的时空变化特征, 并对 NDVI 的空间分布和变化趋势进行因子探测、风险探测以及交互作用分析。结果表明, 近 25 a 来, 中亚地区植被变化整体上保持平稳波动, 哈萨克丘陵中低海拔区域 NDVI 呈极显著上升; 咸海盆地西南部受干涸湖盆盐尘近距离扩散影响, NDVI 则呈极显著下降; 由于中亚各国间水资源开发利用的矛盾, 锡尔河中游和下游的 NDVI 变化趋势相反; 哈萨克斯坦北部旱地由于存在先弃耕后复垦的现象, NDVI 下降趋势较大, 但结果并不显著 ($P > 0.1$); 根据地理探测器模型分析结果, 水分因素主导着中亚地区植被的生长格局, 气温与 NDVI 变化呈显著负相关, 此外不同地形、高程、土壤类型、土地覆被类型之间, NDVI 的时空变化差异也十分显著; 在交互因子作用方面, 双因子交互作用有助于增强对 NDVI 空间分布以及时空变化的解释力, 潜在蒸散发与高程的协同作用对 NDVI 空间分布的解释力达到 64% 以上。

关键词: NDVI; 中亚; 地理探测器; 趋势分析; 时空变化

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2019)04-0032-09

0 引言

在全球气候变化的大背景下, 中亚地区从 20 世纪 70 年代起气温开始迅速上升, 平均增温速率达到 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 远高于同期全球变暖速率^[1-2]。与此同时, 不合理的土地开发利用方式^[3]、粗犷的农田灌溉模式^[4]等人类活动的不断增强更加剧了区域生态与资源的竞争局面。于是, 中亚地区开始出现了土壤盐渍化^[5]、湿地退化^[6]和湖泊萎缩^[7]等一系列生态环境问题。植被作为联结大气圈、土壤圈、水圈和生物圈的重要纽带, 对生态环境变化具有极高的敏感性^[8]。因此研究中亚地区的植被时空变化特征及其对气候变化和人类活动的响应, 对进一步

研究中亚地区陆表环境变化过程及区域生态环境保护具有重要意义。

近几年不少学者通过经验正交模型 (empirical orthogonal function, EOF)^[9]、变异系数 (coefficient of variation, CV)^[10]、Hurst 指数^[11]和趋势分析^[12]等方法研究了中亚地区的植被空间分布特征和变化趋势, 通过相关分析^[13]、偏相关分析^[14]和奇异值分解 (singular value decomposition, SVD)^[15]等方法分析不同空间和时间尺度上中亚地区植被覆盖变化对气候变化的响应特征。但前人研究大多集中于气温和降水这 2 个气候因子对植被变化的影响, 忽略了其他气候因素以及地形、土壤等多种因素的作用。由于中亚地区地形较为复杂, 不同地形区域的气候因素对植被生长的影响可能完全不同, 比如在中亚东

收稿日期: 2018-10-26; 修订日期: 2019-01-01

基金项目: 中国科学院战略性先导专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(编号: XDA2006030102)、国家自然科学基金项目“中亚重大河河流域地表水环境演变规律及其风险预警”(编号: U1603242)、中国科学院科技服务网络计划项目“中亚水环境承载力与水处理技术示范应用”(编号: KFJ-ST-S-QYZD-071)和中国科学院青年创新促进会项目(编号: 2018476)共同资助。

第一作者: 王伟 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感方面研究。Email: wangwei177@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 吉力力·阿不都外力 (1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事干旱区方面研究。Email: jilil@ms.xjb.ac.cn。

南部山区,年均气温与植被变化呈显著的正相关^[3],而在中亚西南部地区气候转暖趋势则加剧了当地的干旱^[4]。近些年来,人类活动对土地利用与覆被变化的影响加剧,尤其是 1991 年苏联解体以来,更是发生了显著变化^[4]。这些因素无一不影响着中亚地区植被覆盖的时空变化特征,除此之外,这些因素之间的交互作用往往也会增强其对植被覆盖变化的影响。

有关自然和人为因子对中亚植被覆被特征的影响方面,前人已经做了大量的工作,然而**还有一些问题仍然没有得到有效解决。例如,对中亚地区植被覆盖变化与驱动因子的研究应该不仅是从两者相关系数空间分布的角度出发,而且更要理清驱动因子与植被覆盖变化之间的规律与内在机理,这样才有助于全面了解中亚乃至整个亚洲中部干旱区植被覆盖时空变化的趋势和未来生态环境演化的方向。应用王劲峰等^[5]提出的地理探测器模型不仅可以弥补这一不足,也可为其他地区植被时空变化特征影响因素研究提供可行的方法。**本文利用分区统计和趋势分析的方法研究中亚地区 1991—2015 年间植被覆盖的时空变化特征,结合地理探测器模型分析气候、地形、土壤和土地覆被等多种变量的空间分异特征和变化趋势对中亚地区植被覆盖时空变化的驱动作用,并研究了不同因子之间的交互作用对植被

覆盖时空变化的影响。进一步揭示气候变化和人类活动对中亚植被覆盖变化的作用机理,旨在为中亚地区生态环境建设和制定社会经济可持续发展模式提供理论基础和科学依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

本文所研究的中亚范围西达里海与伏尔加河,东与中国接壤,北至额尔齐斯河的分水岭,并延伸至西西伯利亚平原南部,南临伊朗与阿富汗的边界,地理位置在 $N35^{\circ}5'2.24'' \sim 52^{\circ}33'30.49''$, $E46^{\circ}45'28.13'' \sim 87^{\circ}21'47.81''$ 之间。行政区域涵盖中亚五国,即哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦和土库曼斯坦,总面积近 $4 \times 10^5 \text{ km}^2$,人口接近 6.6×10^6 ,人口密度约 17 人/km^2 ,是典型的地广人稀区域^[7]。整体上中亚地势呈东南高,西北低,由于受东南部高山阻挡,来自印度洋和太平洋的水汽无法深入,这就使得中亚五国成为北半球温带面积最大的干旱区。同样受地形和气候等多种因素影响,中亚的植被分布具有明显的空间分异性。因此本文在高程数据的基础上,结合已有地形图将中亚地区划分为 8 大地形区(图 1),来研究不同地形区植被覆盖的变化特征。

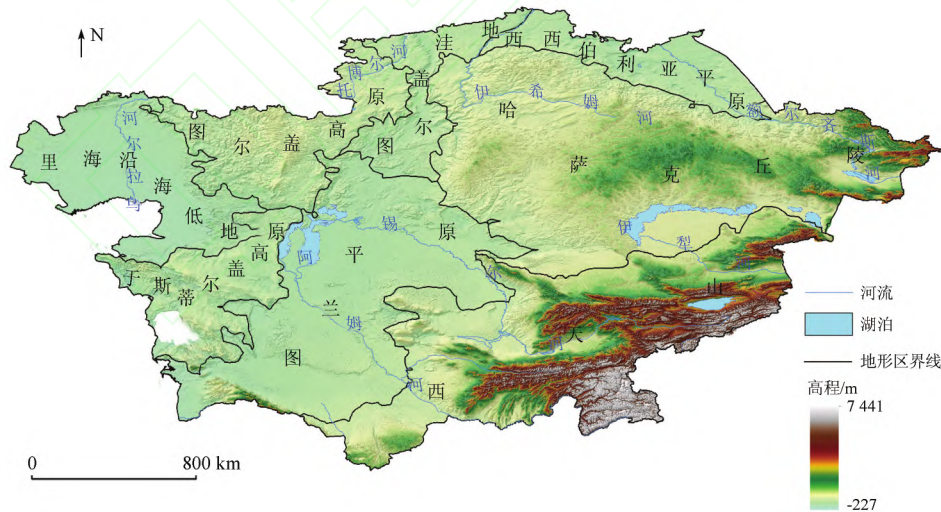


图 1 研究区域示意图

Fig.1 Map of research area

1.2 数据来源与预处理

本文采用的数据如表 1 所示,由于数据为不同来源和不同空间分辨率,本文结合模型的运算能力和研究任务的精度要求,基于最邻近距离法对数据

集进行了重采样,最后去除缺失值,共得到 20 569 行数据。由于地理探测器模型输入的自变量必须保证是离散型数据,因此基于 R 语言“GD”包的“op-tidisc”函数,对数据进行了离散化处理。

表 1 数据来源与预处理
Tab. 1 Data source and data preprocessing

数据集	数据来源	时间分辨率	空间分辨率	数据预处理
NDVI 数据集	NASA 艾姆斯研究中心生态预测实验室发布的 GIMMS NDVI 3g v1 数据产品 (1991—2015 年)	15 d	8 km	最大化合成法合成逐年 NDVI 数据
气候数据集	英国东英吉利大学 CRU 小组发布的 cru_ts_4.01 (1991—2015 年), 数据包括: 气温 (最高气温、最低气温、平均气温)、降水量、湿日频率、潜在蒸散发、云量和日较差	30 d	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$	双线性内插法进行重采样, 重采样后的空间分辨率为 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$
土壤类型数据集	FAO 世界土壤数据库的土壤类型数据	—	1 km	按照 FAO90 标准对土壤类型进行重分类, 共分为 13 类
土壤湿度数据集	欧洲中期天气预报中心表层土壤湿度再分析数据	30 d	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	双线性内插法进行重采样, 重采样后的空间分辨率为 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$
土地覆被数据集	欧空局的 ESA_CCI 的土地覆被数据 (1991—2015 年)	1 a	300 m	对土地覆被类型重分类为 8 类
高程数据	NASA 的 STRM (shuttle Radar topographic mission) 数字高程数据	—	90 m	—

2 研究方法

2.1 趋势分析法

基于最小二乘法的一元线性回归模型对植被变化进行趋势分析是研究植被动态变化的常用方法^[8-10], 对 1991—2015 年间中亚地区逐年植被覆盖变化进行逐像元趋势性分析, 计算公式为^[9]

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n (i V_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n V_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}, \quad (1)$$

式中: n 为研究时段的年数; V_i 为第 i 年的 NDVI 值 ($i=1, 2, \dots, 25$); S 为植被覆盖变化趋势斜率, 当 S 为正值时, 则该像元 NDVI 值呈上升的趋势, 反之呈下降的趋势。

为了更好地表达植被覆盖的变化趋势, 采用 F 检验对 NDVI 的变化趋势进行显著性检验, 显著性检验结果反映了趋势变化可信度的高低, F 检验统计量计算公式为^[20]

$$\begin{cases} F = U \frac{n-2}{Q} \\ U = \sum_{i=1}^n (\hat{V}_i - \bar{V}_i)^2 \\ Q = \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: F 为 F 检验统计量; U 为误差平方和; Q 为回归平方和; $\bar{V}_i$ 为第 i 年 NDVI 的平均值; $\hat{V}_i$ 为第 i 年 NDVI 回归值。根据显著性检验结果和变化趋势斜率 S 的大小将 NDVI 的变化趋势分为 5 种类型,

如表 2 所示。

表 2 NDVI 变化趋势类型
Tab. 2 Types of NDVI change trend

NDVI 变化趋势类型	S	显著性 P 值	F
极显著增加	$(0, +\infty)$	$(-\infty, 0.001)$	$(14.19, +\infty)$
显著增加	$(0, +\infty)$	$(0.001, 0.1)$	$(2.937, 14.19)$
变化不显著	$(-\infty, +\infty)$	$(0.1, +\infty)$	$(-\infty, 2.937)$
显著减少	$(-\infty, 0)$	$(0.001, 0.1)$	$(2.937, 14.19)$
极显著减少	$(-\infty, 0)$	$(-\infty, 0.001)$	$(14.19, +\infty)$

2.2 地理探测器模型

地理探测器主要包含以下 3 种探测器:

1) 因子探测器, 该探测器表示研究中每个影响因子变化趋势对 NDVI 时空变化趋势的影响大小, q 值越高的影响因子, 对 NDVI 变化的影响力越大。

2) 风险探测器, 探测因子对 NDVI 变化是否具有风险性, 指示因子在不同等级范围内对 NDVI 时空变化的影响。

3) 交互作用探测器, 用于判断不同影响因子对植被时空变化的交互作用。通过比较在单因子作用时的 q 值、2 个单因子的 q 值之和与双因子交互作用时的 q 值, 根据三者之间的大小关系, 将交互作用类型分为 5 类, 如表 3 所示。

表 3 双因子交互作用结果类型
Tab. 3 Types of two-factor interaction result

交互作用类型	q 值比较
非线性减弱	$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$
单因子非线性减弱	$\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$
双因子增强	$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$
独立	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$
非线性增强	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$

从上面的 3 个探测器可以看出,在地理探测器中, q 值是衡量一个因子对因变量的贡献率或者说是解释力,其模型表达式^[5] 为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}, \quad (3)$$

式中: $h = 1, \cdots, L$, 为 NDVI 值影响因子的分层,即分类或分区; N_h 和 N 分别为 h 层和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是 h 层和全区 NDVI 值的方差; SSW

和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差, q 的值域为 $(0,1)$ 。

3 结果与分析

3.1 中亚 NDVI 的空间分异特征

利用栅格计算器计算得到 1991—2015 年间中亚地区 NDVI 空间分布及其变化率、土地覆被类型和土壤类型如图 2 所示。

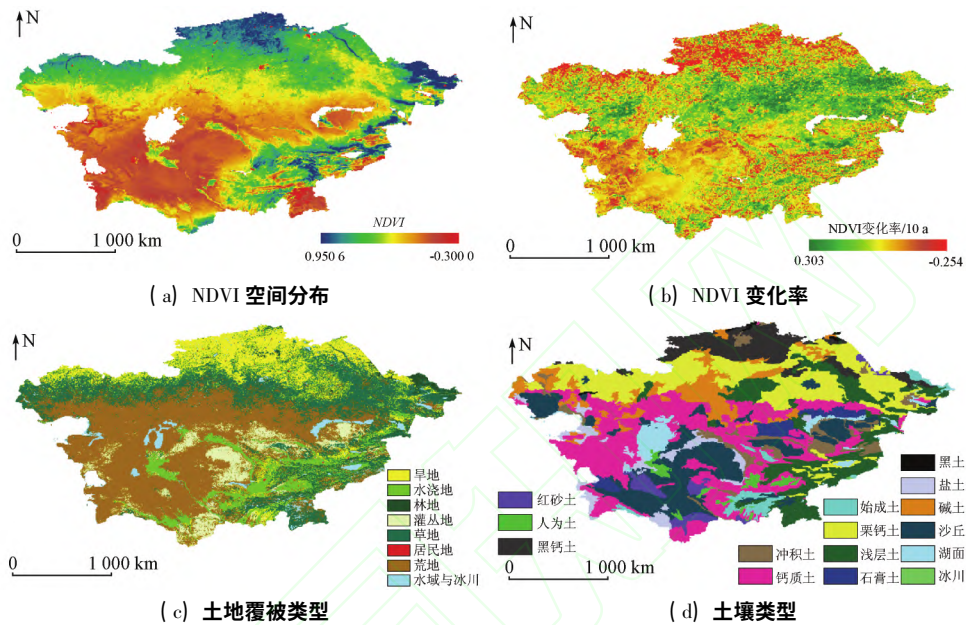


图 2 中亚地区 NDVI 空间分布与变化率、土地覆被类型和土壤类型

Fig. 2 Spatial distribution of NDVI, NDVI changes, land cover types and soil types

从图 2(a) 可以看出,中亚地区 NDVI 具有明显的空间分异性,在平原区,NDVI 平行纬度呈带状分布,从南向北逐渐增加,绿洲沿河流两岸呈带状分布,河口三角洲地带普遍发育绿洲; 在山区,NDVI 空间分布较平原区复杂,NDVI 随高程增加先升高后降低。因此可以看出中亚地区植被覆盖空间分布主要受纬度地带性、垂直地带性规律共同作用。

不同地形区和土地覆被类型对应的 NDVI 值变化情况如图 3 所示,从地形区上看(图 3(a)),西西伯利亚平原和哈萨克丘陵东北部地区 NDVI 最高,NDVI 平均值为 0.551,图兰平原和于斯蒂尔盖高原最低。从土地覆被类型上看(图 3(b)),林地 NDVI 最高,平均值为 0.7,旱地次之,水域与冰川 NDVI 最低。

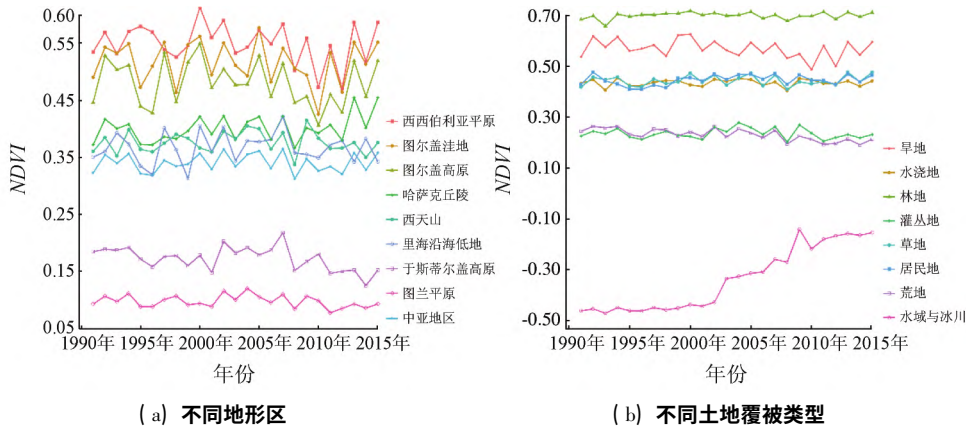


图 3 不同地形区和土地覆被类型对应的 NDVI 值变化

Fig. 3 Changes of NDVI values corresponding to different terrain areas and land cover types

3.2 中亚 NDVI 时空变化特征

3.2.1 中亚 NDVI 的时间变化特征

如图 3(a) 所示,1991—2015 年间中亚地区 NDVI 的平均值为 0.34,其年均 NDVI 最高值出现在 2007 年,达到 0.365,最低值出现在 2008 年,为 0.312。哈萨克丘陵和图尔盖高原地区在近 5 a 来呈持续上升的趋势,然而于斯蒂尔盖高原和图兰平原地区在近 10 a 间呈明显下降趋势。如图 3(b) 所示,旱地、灌丛地和荒地的 NDVI 值略有下降,水域与冰川的 NDVI 从 2000 年后开始持续上升。水域 NDVI 的升高可能归因于中亚地区部分水域面积减小,水位下降;水中悬浮物浓度增加、透明度减小、近岸浅水区水生植物增加,水质变差导致^[21]。

3.2.2 中亚 NDVI 的空间变化特征

近 25 a 来中亚地区植被覆盖总体上呈轻微波动变化,但是部分地区植被覆盖变化也很明显,植被显著改善区域主要集中在哈萨克丘陵的中低海拔地区,虽然从图 2(b) 和(c) 中可以看出,NDVI 下降比

较严重的区域主要分布哈萨克斯坦北部旱地区域。但如图 4 所示的中亚地区植被覆盖变化趋势(经过显著性检验),哈萨克斯坦北部旱地 NDVI 下降趋势并不明显。该原因可能是因为 1991 年苏联解体以来,农田出现弃耕后复垦的现象,但是复垦面积仍然无法达到弃耕前的水平^[22]。植被显著恶化区域主要分布在咸海盆地以南地区,以西南方向最为集中。可能是随着咸海水面退缩后,在干涸湖盆底部形成了大量的富盐细粒沉积物,这些沉积物中的盐粒及其他化学粉尘在风的作用下发生扩散。这些盐尘加重了周边区域的土壤盐碱化,从而导致土壤肥力下降、植被退化等一系列问题^[23-24]。另外,在锡尔河中游和下游的植被变化情况也显著不同(图 4),其原因可能是锡尔河为中亚跨界河流,恰尔达拉水库位于哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦的交界处,自苏联 1991 年解体以来,哈萨克斯坦从跨界河流中的引水能力有所下降^[25],因此锡尔河下游的植被显著降低可归因于其灌溉水资源的受限。

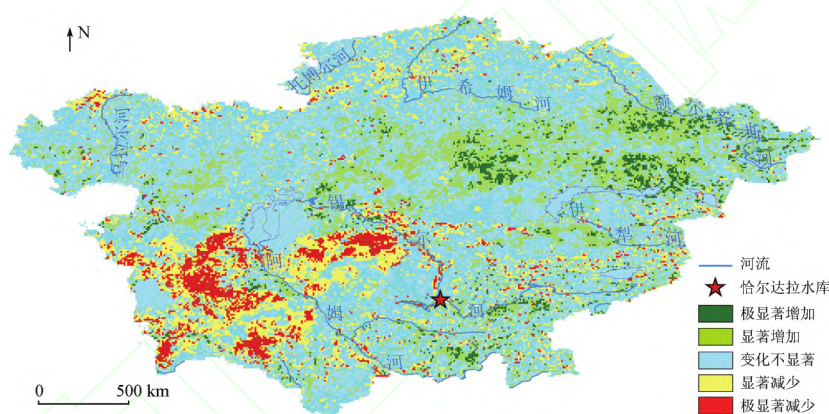


图 4 1991—2015 年中亚地区 NDVI 变化趋势

Fig. 4 Change trend of NDVI in Central Asia during the period from 1991 to 2015

3.3 NDVI 空间分异与变化趋势驱动因子分析

3.3.1 不同驱动因子对 NDVI 空间分异的驱动分析

利用地理探测器模型分别就 NDVI 空间分异特征和变化趋势进行归因,因子探测结果如表 4 所示,不同因子按照对 NDVI 空间分异特征的解释能力排序:土壤湿度 > 湿日频率 > 降水量 > 土壤类型 > 潜在蒸散发 > 最高气温 > 平均气温 > 最低气温 > 地形区 > 云量 > 高程 > 日较差。这也说明中亚地区地处温带面积最大的干旱区,水分因素主导该地区植被的空间分布状况,其次是土壤类型和潜在蒸散发以及气温。风险探测分析和交互作用分析结果如图 5 所示,NDVI 随着降水频率和土壤湿度的增加而增加,然而 NDVI 对不同等级降水量的响应呈现出先升高后降低的趋势。这可能因为在中亚东南部帕米尔高原的高海拔区域,降水量较多,土壤水分含量较高,植被的生长将不再

受水分因素的限制,反而气温开始主导植被的生长状况。NDVI 随着潜在蒸散发的增加而降低。随着云量增加,NDVI 也呈逐渐上升的态势。NDVI 随着高程先增加后降低,高程在 1 500 ~ 2 400 m 之间(分区 5)时,达到峰值,当高程大于 2 400 m 后,NDVI 开始急剧下降。植被生长发育的过程往往不是影响因子单独起作用,而是多种影响因子协同交互作用。从图 5(b) 可以看出,交互作用最强的因子组合为高程和土壤湿度,它们双因子增强交互作用的 q 值为 0.670。这说明高程的变化显著增加了土壤湿度作为自变量对 NDVI 的解释。同时降水量与大多数因子结合都能产生较高的 q 值。高程和潜在蒸散发组合体现了较强的非线性增强交互作用(潜在蒸散发 $\cap$ 高程 = 0.647 > 潜在蒸散发(0.464) + 高程(0.155))。除此之外,高程与多数因子的非线性增强交互作用都很强。

表 4 因子探测器结果
Tab.4 Results of factor detector

因子	NDVI 空间分布的影响因素			NDVI 变化趋势的影响因素		
	q 值	P 值(sig)	q 值排序	q 值	P 值(sig)	q 值排序
地形区/土地覆被类型 ^①	0.340 397	4.03E - 10	9	0.048 216	1.63E - 10	7
土壤类型	0.468 032	5.84E - 10	4	0.047 821	8.94E - 10	8
土壤湿度	0.533 063	5.98E - 10	1	0.018 531	6.19E - 10	11
高程	0.155 681	6.09E - 10	11	0.090 486	4.99E - 11	3
湿日频率	0.518 121	6.22E - 10	2	0.023 415	8.65E - 11	10
最高气温	0.448 316	6.44E - 10	6	0.072 058	2.83E - 10	6
平均气温	0.427 333	3.81E - 10	7	0.042 872	4.35E - 10	9
最低气温	0.408 399	7.58E - 10	8	0.011 680	3.79E - 10	12
降水量	0.491 198	2.46E - 10	3	0.096 278	2.94E - 10	2
潜在蒸散发	0.464 430	3.54E - 10	5	0.109 109	4.30E - 10	1
云量	0.335 372	9.72E - 10	10	0.079 239	7.20E - 11	5
日较差	0.101 138	3.19E - 10	12	0.086 714	5.08E - 11	4

①地形区因子用于 NDVI 空间分异的驱动分析；土地覆被类型用于 NDVI 变化趋势的驱动分析。

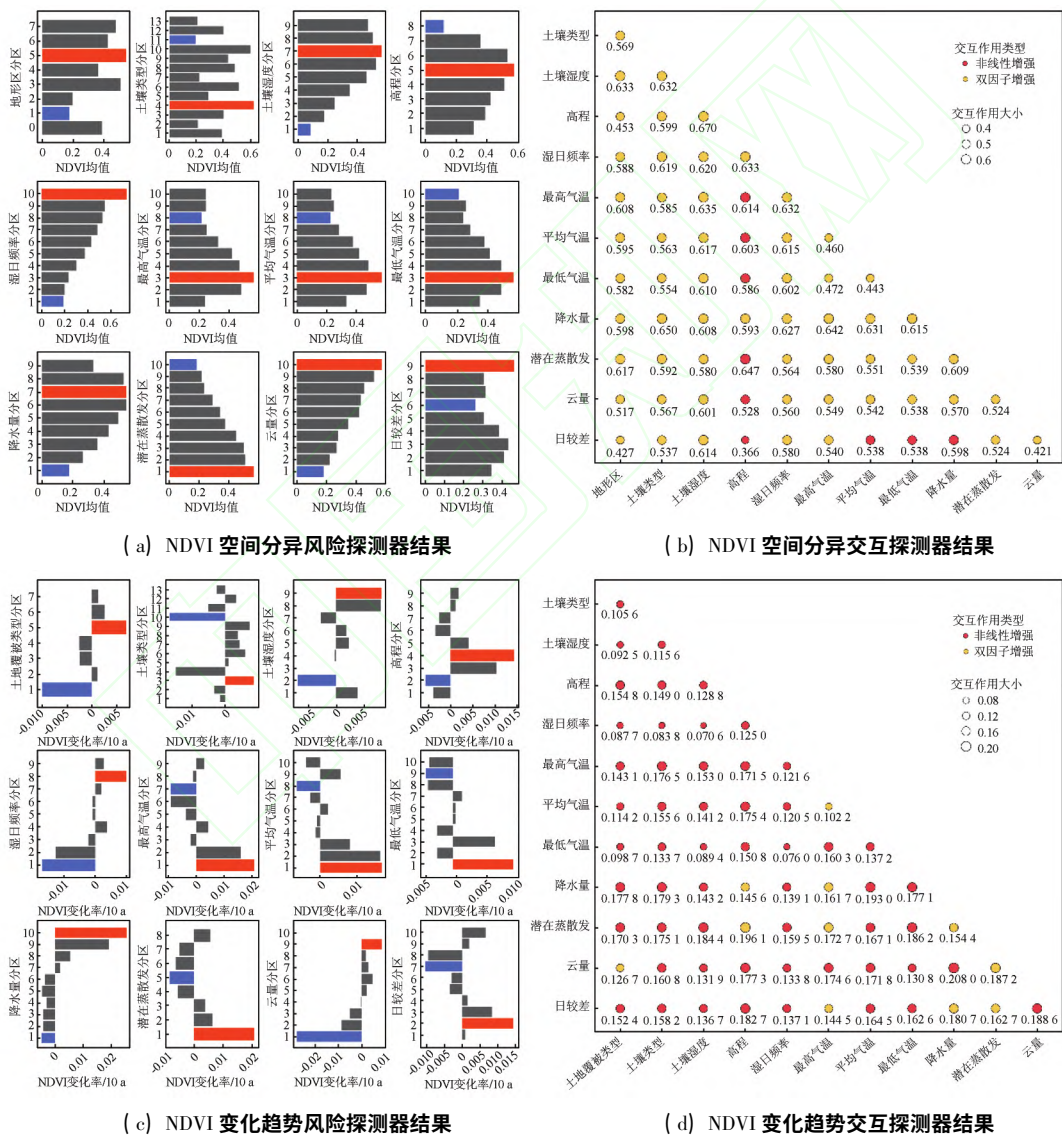


图 5 风险探测器结果和交互探测器结果

Fig.5 Results of risk detector and interaction detector

3.3.2 不同驱动因子对 NDVI 变化趋势的驱动分析
从 NDVI 变化趋势的因子探测结果(表 4)可以看出,不同驱动因子的 q 值并不高,但是依然可以反

映出不同驱动因子对 NDVI 变化趋势的影响差异。如图 5(c) 所示潜在蒸散发增长最慢的区域(分区 1), NDVI 增加的最快,这说明区域潜在蒸散发的增

长对 NDVI 的增长有一定的抑制作用。降水量增加最快的区域(分区 10),NDVI 增长的也最快,但是降水量变化较小和降水量下降的区域基本上 NDVI 变化不大。在不同高程范围内,NDVI 增长较快的区域高程范围在 300 ~ 1 000 m 之间(分区 4),主要集中在一些低山、丘陵地区。NDVI 对不同类型气温的响应基本一致,增温慢的区域 NDVI 增长迅速,这一点在最高温度变化方面最为明显。云量下降最快的区域,NDVI 降低趋势远超其他区域,这也说明在中亚干旱区,云量一定程度上代表着区域的降水潜力。不同土地覆被类型对 NDVI 的变化也存在很大的空间分异特征,旱地(分区 1)的 NDVI 下降最明显,草地(分区 5)的 NDVI 上升最快。在土壤类型方面,黑土(分区 10)和黑钙土(分区 4)上生长的植被出现了明显的减少趋势,如图 2(d) 所示这 2 种土壤都是肥力较高的土壤且广泛分布于中亚北部地区,所以这些地区的土地很早就被开发为旱地。但是由于苏联解体使得大量农田弃耕,这些区域的 NDVI 下降趋势也较大。

在 NDVI 变化趋势影响因子的交互作用方面,80% 以上影响因子组合方式表现出非线性增强作用,其余因子也表现出了双因子增强作用(图 5(d))。交互作用解释力排在第一位的是云量和降水量组合(q 值为 0.208 0),其次是潜在蒸散发和高程组合(q 值为 0.196 1)以及降水量和平均气温组合(q 值为 0.193 0)。除此之外,还可以看出潜在蒸散发和其他影响因子的交互作用表现明显,而湿日频率和其他影响因子的交互作用较弱。

4 结论

本文利用趋势分析法和地理探测器模型研究中亚地区 NDVI 时空分布与变化特征及其影响因子的驱动作用,并研究了双因子之间交互作用对 NDVI 时空分布及变化特征的影响,得到以下主要结论:

1) 1991—2015 年间中亚地区植被变化整体上处于平稳波动状态。从局部地区看,哈萨克丘陵中低海拔地区 NDVI 表现出明显的上升趋势,咸海西南部 NDVI 呈极显著下降,可能归因于咸海盆地盐尘的近距离扩散;同时水域 NDVI 的上升表明中亚湖泊整体水环境质量在下降。

2) 人类活动对中亚地区植被覆盖的影响比较明显。由于苏联解体导致的弃耕后复垦现象,哈萨克斯坦北部旱地区域的 NDVI 下降趋势虽然很大,但是趋势并不能通过显著性检验;另外锡尔河中游和下游地区 NDVI 变化的显著差异也体现了中亚各个国家间围绕水资源开发利用问题上的一些矛盾。

3) 根据地理探测器研究表明,水分因素主导着中亚地区植被覆盖的时空分布格局;在不同增温背景下,NDVI 的变化趋势显著不同;另外不同高程范围、不同土地覆被类型、不同土壤类型下 NDVI 的时空变化特征也有显著差异。

4) 因子间交互作用均能增强其对植被空间分异和变化趋势的解释力;潜在蒸散发和高程的非线性增强交互作用对 NDVI 空间分异的影响最为显著;云量和降水量的非线性增强交互作用对 NDVI 的变化趋势影响最为显著;另外,潜在蒸散发和高程作为影响因素可以较大地增强其他因子对 NDVI 空间分异以及变化趋势的解释能力。

然而,基于 AVHRR 卫星影像的 NDVI 数据虽然具有较长的时间序列和较高的时间分辨率,但空间分辨率较低。因此,下一步希望采用具有更高空间分辨率的 MODIS 数据,开展小尺度范围内的 NDVI 影响因子研究。另外,关于潜在蒸散发是如何增强其他因子对 NDVI 空间分异和变化趋势的解释能力,还需进行更加深入的讨论。

参考文献(References):

- [1] Chen F H, Wang J S, Jin L Y, et al. Rapid warming in mid-latitude Central Asia for the past 100 years [J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3(1): 42-50.
- [2] 秦大河. 气候变化科学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 35-38.
- [3] Qin D H. Introduction to Climate Change Science [M]. Beijing: Science Press, 2018: 35-38.
- [4] Klein I, Gessner U, Kuenzer C. Regional land cover mapping and change detection in Central Asia using MODIS time-series [J]. *Applied Geography*, 2012, 35(1-2): 219-234.
- [5] Micklin P. The future Aral Sea: Hope and despair [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 844, 1-15.
- [6] Bezborodov G A, Shadmanov D K, Mirhashimov R T, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 138(1): 95-102.
- [7] 程彦培, 张发旺, 董华, 等. 基于 MODIS 卫星数据的中亚地区水体动态监测研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(5): 33-37.
- [8] Cheng Y P, Zhang F W, Dong H, et al. Wetland dynamic monitoring in Central Asia based on MODIS image [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2010, 37(5): 33-37.
- [9] 成晨, 傅文学, 胡召玲, 等. 基于遥感技术的近 30 年中亚地区主要湖泊变化 [J]. *国土资源遥感*, 2015, 27(1): 146-152. doi: 10.6046/gtzyyg. 2015. 01. 23.
- [10] Cheng C, Fu W X, Hu Z L, et al. Changes of major lakes in Central Asia over the past 30 years revealed by remote sensing technology [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2015, 27(1): 146-152. doi: 10.6046/gtzyyg. 2015. 01. 23.
- [11] Schwartz M D. Green-wave phenology [J]. *Nature*, 1998, 394(6696): 839-840.

- [1] 殷刚,孟现勇,王浩,等. 1982—2012年中亚地区植被时空变化特征及其与气候变化的相关分析[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3149–3163.
Yin G, Meng X Y, Wang H, et al. Spatial-temporal variation of vegetation and its correlation with climate change in Central Asia during the period of 1982–2012[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3149–3163.
- [10] 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 X Y, Yao J Q, Liu Z H. 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.
- [11] 索玉霞,王正兴,刘闯,等. 中亚地区1982年至2002年植被指数与气温降水的相关性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1422–1429.
Suo Y X, Wang Z X, Liu C, et al. Relationship between NDVI and precipitation and temperature in Middle Asia during 1982–2002[J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1422–1429.
- [12] 张琪,袁秀亮,陈曦,等. 1982—2012年中亚植被变化及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 13–23.
Zhang Q, Yuan X L, Chen X, et al. Vegetation change and its response to climate change in Central Asia from 1982 to 2012[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 13–23.
- [13] 索玉霞. 中亚五国植被覆盖变化与气候因子相关性分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
Suo Y X. Correlation of Vegetation Dynamics and Climate Variability in the Middle Asia[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Science, 2009.
- [14] Shigaeva J, Kollmair M, Niederer P, et al. Livelihoods in transition: Changing land use strategies and ecological implications in a post-Soviet setting (Kyrgyzstan)[J]. Central Asian Survey, 2007, 26(3): 389–406.
- [15] 王劲峰,徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116–134.
- [16] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 1–12.
Hu R J, Jiang F Q, Wang Y J, et al. Arid ecological and geographical conditions in five countries of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 1–12.
- [17] 吉力力·阿不都外力,马龙. 中亚环境概论[M]. 北京: 气象出版社, 2015: 275–293.
Abuduwaili J, Ma L. Overview of Central Asian Environments[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015: 275–293.
- [18] 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): 5331–5342.
Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982–2012[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5331–5342.
- [19] 刘家福,马帅,李帅,等. 1982—2016年东北黑土区植被NDVI动态及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7647–7657.
Liu J F, Ma S, Li S, et al. Changes in vegetation NDVI from 1982 to 2016 and its responses to climate change in the black-soil area of Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7647–7657.
- [20] 穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001—2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3752–3764.
Mu S J, Li J L, Zhou W, et al. Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3752–3764.
- [21] 赵宁,马超,杨亚莉. 1973—2013年红碱淖水域水质变化及驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 982–993.
Zhao N, Ma C, Yang Y L. Water quality variation of Lake Hongjiannao and its driving force analysis from 1973 to 2013[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(5): 982–993.
- [22] Dara A, Baumann M, Kuemmerle T, et al. Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 213: 49–60.
- [23] Shen H, Abuduwaili J, Samat A, et al. A review on the research of modern aeolian dust in Central Asia[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(13): 625, 1–16.
- [24] Ge Y X, Abuduwaili J, Ma L, et al. Temporal variability and potential diffusion characteristics of dust aerosol originating from the Aral Sea Basin, Central Asia[J]. Water Air and Soil Pollution, 2016, 227(2): 63, 1–12.
- [25] 吴森,张小云,罗格平,等. 哈萨克斯坦水资源利用[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 196–202.
Wu M, Zhang X Y, Luo G P, et al. Situation of water resources utilization in Kazakhstan[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(2): 196–202.

Geo-detector based spatio-temporal variation characteristics and driving factors analysis of NDVI in Central Asia

WANG Wei^{1,2,3}, Alim Samat^{1,3}, Jilili Abuduwaili^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China)

Abstract: Vegetation is an important nexus connecting atmosphere, pedosphere, hydrosphere and biosphere. Therefore, the relationship between the temporal and spatial variation characteristics of vegetation and its driving

factors is of great significance in the study of regional ecological environment changes. Based on multiple data sets such as GIMMS NDVI and CRU, the authors analyzed the temporal and spatial variation characteristics of NDVI in Central Asia from 1991 to 2015, using trend analysis and geo-detector model that included factor detection, risk detection and interaction analysis. The results show that the vegetation activities in Central Asia have remained stable and volatile on the whole in the past 25 years. In detail, NDVI in the middle and low altitude areas of the Kazakh hills has increased significantly, while the NDVI in the southwestern part of Aral Sea has been significantly reduced because of the close diffusion of salt dust in the Aral Sea basin. In addition, because of the contradiction between water resources development and utilization among Central Asian countries, the trend of NDVI in the midstream of the Syr Darya and the downstream has been reversed. The non-irrigated farmland in northern Kazakhstan has a large decline in NDVI, and the results are not significant ($P \geq 0.1$) due to the phenomenon of re-cultivation. According to the results of geo-detector model, the water factor dominates the vegetation growth pattern in Central Asia, and the temperature is negatively correlated with the NDVI change. The difference in spatial and temporal variation of NDVI between different terrains, elevations, soil types and land use types is also significant. In terms of the interaction factor, the bi-factor interaction has enhanced the interpretation of spatial distribution and temporal and spatial variation of NDVI. The synergistic effect of potential evapotranspiration and elevation on the spatial distribution of NDVI is over 64%.

Keywords: NDVI; Central Asia; geographical detector; trend analysis; temporal and spatial variation

(责任编辑: 陈 理)