

引用格式: 马超, 李晓婷, 项晓铭, 等. 浑善达克沙地腹地和边缘交错区 NDVI 演变对气候变化和人类活动的响应[J]. 资源科学, 2023, 45(1): 204–221. [Ma C, Li X T, Xiang X M, et al. Responses of NDVI evolution to climate change and human activities in the Hunshandake Sandy Land and its ecotones[J]. Resources Science, 2023, 45(1): 204–221.] DOI: 10.18402/resci.2023.01.15

浑善达克沙地腹地和边缘交错区 NDVI 演变对气候变化和人类活动的响应

马 超^{1,2,3}, 李晓婷¹, 项晓铭¹, 刘玮玮⁴, 李婷婷¹

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454003; 2. 河南理工大学自然资源部矿山时空信息与生态修复重点实验室, 焦作 454003; 3. 河南理工大学黄河流域耕地保护与城乡高质量发展研究中心, 焦作 454003; 4. 河南省国土资源厅测绘地理信息局, 郑州 450003)

摘 要:【目的】因研究区、研究数据、研究时段选择不同, 浑善达克沙地的植被演变认识存在学术分歧。沙地腹地和边缘交错区的植被如何响应气候变化和人类活动, 有待厘清。【方法】本文设置戈壁风蚀荒漠区为背景区, 将沙地及周边区域分为沙地核心区和4种过渡类型区, 基于长时序GIMMS NDVI3g v1.0(1982—2015年)数据集, 结合气候、灯光、人口和畜牧业数据, 分析了核心区及生态交错区植被物候、NDVI与气候变化和人类活动的相关性。【结果】研究发现: ①沙地植被物候存在地带性差异: 植被返青期(SOS)由东向西推迟, 枯黄期(EOS)由西向东推迟, 生长期(LOS)介于158~196 a之间, 区内地带性差异达到38 d。②沙地植被增长率具有空间差异性: 浑善达克沙地NDVI整体以0.00021/10 a的速率增加但不显著, 各区NDVI增长速率有差异, 最低增速与最高增速相差17倍。浑善达克沙地有向西、向南扩张, 向东、向北收缩趋势。③沙地气候呈暖干化趋势: 34年来气温以0.3 °C/10 a的速率波动上升, 降水以-14.0 mm/10 a的速率波动下降, 各区植被对气温的敏感性高于降水。④沙地植被变异系数具有阶段性: 20世纪80年代波动较低, 90年代相对稳定, 21世纪前15年正向变异较高; 植被覆盖度较高的东部边界变异系数小, 而裸地较多、植被单一的西部、北部边界, 变异系数大。⑤沙地植被响应人类活动不显著: NDVI与单位人口密度、灯光亮度不相关, 与单位绵羊密度及总食草牲畜密度局部相关, NDVI与人类活动总体不显著相关。【结论】34年来浑善达克沙地腹地及其生态交错区积极响应气候波动, NDVI虽在21世纪有所改善, 但也仅仅达到20世纪80年代中后期水平。

关键词: 生态交错区; 植被物候; 气候变化; 变异系数; 人类活动; 浑善达克沙地

DOI: 10.18402/resci.2023.01.15

1 引言

在气候变化和人类活动交互影响下, 全球经历了强烈的沙漠化发展^[1]。沙漠化、土地退化和干旱阻碍全球可持续发展, 会造成并加剧环境、经济和社会问题^[2]。联合国于1977年专门召开了防治荒漠化会议, 并将这一议题纳入2030年可持续发展议程: 到2030年, 防治荒漠化, 恢复退化土地和土壤, 包括受荒漠化、干旱和洪水影响的土地, 努力实现

土地退化零增长^[3-5]。2017年统计表明, 全球荒漠化面积达到了3370万 km², 占陆地面积的25.97%, 在100多个国家和地区, 超过2.5亿人受到荒漠化的直接威胁^[6]。

内蒙古自治区中东部的浑善达克沙地是中国四大沙地(科尔沁、毛乌素、呼伦贝尔、浑善达克)之一^[7]。地理位置位于京津天气系统上游, 距北京直线距离180 km, 是影响京、津地区的沙尘源之一^[8]。

收稿日期: 2022-07-28 修订日期: 2023-01-03

基金项目: 国家自然科学基金-河南区域创新发展重点资助项目(U21A20108); 河南省高校科技创新团队支持计划(22IRTSTHN008)。

作者简介: 马超, 男, 内蒙古克什克腾旗人, 教授, 研究方向为自然灾害遥感和生态环境遥感。E-mail: mac@hpu.edu.cn

通讯作者: 李婷婷, 女, 山西临汾人, 博士研究生, 研究方向为生态环境遥感。E-mail: 111804010002@home.hpu.edu.cn

2023年1月

自20世纪80年代以来,浑善达克沙地一直是内陆干旱区古地质^[9]、古地理^[10]、古环境^[11]和古气候重建^[12]研究的热点地区之一。早期的研究多专注于沙地历史成因、古土壤、古气候研究,浑善达克沙地的前世今生和古气候变迁已经基本厘清^[13-15]。进入21世纪,随着气候变化和人类活动日趋加剧,浑善达克沙地因其地理上干旱、少雨、多风,且天然土壤基质不稳定,使其生态形势日趋严峻,不仅严重阻碍当地经济的发展,还威胁首都圈及东北亚地区生态安全,因此重新吸引各国生态学者的关注^[16]。研究表明,剧烈的气候变化和人类活动导致该区域出现了诸如地表径流减少^[17,18]、湖泊萎缩^[19-21]、植被生理生态损伤^[22-24]、植被群落破坏^[25,26]、草场退化^[27,28]、沙漠活化^[29,30]、土地盐渍化^[31]、有机碳流失^[32]和生态系统服务功能下降^[33,34]等一系列生态环境问题。

尽管浑善达克沙地已经有40多年的研究历史,但关于沙地的荒漠化发生、演变、生态系统服务功能退化以及荒漠化治理对策等方面仍存分歧^[35]。如早期的研究认为,20世纪50年代以来,中国的流动沙漠趋于稳定^[36];70年代以来,流动沙地面积不断增加^[37];90年代以来,湿润导致沙漠化进程的放缓甚至逆转,沙地的波动与气温和降水密切相关^[8,38,39];而近期的研究则认为浑善达克沙地生态脆弱性有所增强^[1,30,40,41]。这些分歧的产生主要是基于不同的研究时长和研究视角造成的,采用不同的时空尺度、不同的数据集、研究不同的生态要素,往往引出像“盲人摸象,以偏概全”的学术争议。这些分歧中,最突出表现为“浑善达克沙地”的边界尚未达成共识,先后出现了2.14万km²^[7,10,13,18],5.3万km²^[8,38],3.71万km²^[9],5.2万km²^[11],4.0767万km²^[17],5.2万km²^[19],7.12万km²^[23],7.4万km²^[26],4.08万km²^[32],2.1万~3.8万km²^[35],7.1万km²^[37],4.1639万km²^[39]等诸多范围,更有一些研究将行政边界(16.81万km²)视为沙地边界^[42],这显然有失科学性。此外,针对浑善达克沙地这种“干旱草原-沙漠前期”的震荡类型区,仍然存在关于沙漠腹地和沙漠边缘基本功能的问题^[43,44]。即它的沙漠腹地和沙漠边缘交错区如何与区域气候系统进行互动,以及它们如何响应最近的自然和人为的气候变化,仍然悬而未决。

鉴于此,为了厘清以上问题,尝试将先前研究认同度较高的沙地区域,即2.14万km²设置为核心区(Core Area, CA),根据地表覆被类型将区域周边

细分为生态对比区和4种生态交错区:戈壁-沙地生态交错区,沙地-灌丛生态交错区,沙地-草地生态交错区,沙地-林地生态交错区;拟采用长时序的遥感植被指数产品GIMMS NDVI3g v1.0(1982—2015年)、气象数据(1982—2015年气温/降水)、灯光数据(1984—2015年)、人口数据(1986—2015年)和区域畜牧业数据(1986—2015年),分析不同覆被类型区域NDVI年际变化对气候和人类活动的响应;探讨不同植被覆盖类型、不同人类活动强度、不同气候对NDVI波动的影响。其中,气候变化对NDVI的影响选择时段为1982—2015年,因年鉴数据缺失,人类活动对NDVI的影响选择时段为1986—2015年。研究不但监测其内部中长期的生态质量变化,同时重点分析其边缘生态交错区生态质量的变化,通过明辨不同类型区的生态演化倾向及气候响应趋势,澄清由于时间、空间、要素选择造成的片面认识。

2 研究区设置

2.1 核心区

浑善达克沙地地处内蒙古高原,位于亚洲干旱地理带最东端。地理范围为111°40'E—117°30'E,41°50'N—43°50'N,海拔1100~1300 m。东西总跨度450 km,南北宽逾250 km,包含固定沙地、半固定沙地、流动沙地、半流动沙地、丘间草地和低湿地等6种景观类型,核心区总面积2.14万km²^[7,10,13]。沙地主体向东延伸为大兴安岭山地西麓,向西延伸为戈壁荒漠,南部延伸至燕山北缘的低山丘陵,北部则为锡林郭勒草原^[8]。行政隶属内蒙古自治区苏尼特左旗、苏尼特右旗、阿巴嘎旗、正镶白旗、正蓝旗、镶黄旗、多伦县、克什克腾旗、锡林浩特市及河北省围场满族蒙古族自治县共9县1市,主要分布在内蒙古的赤峰市和锡林浩特市境内,部分延伸至河北境内(图1a, 1b)。

浑善达克沙地核心区的土壤为发育在古生代形成的砂型母岩的风沙栗钙土^[10]。沙质土壤缝隙大、土质疏松、透水透气性好,能够充分吸收降水,紧邻的南部山地地表水和地下潜流补给丰富,分布着500多处的小湖泊和沙泉,这些大小各异的湖泊洼地,形成了当地特有的“亦湖-亦草-亦沙”奇特自然景观^[14]。

浑善达克沙地地表植被种类丰富,干旱草原以

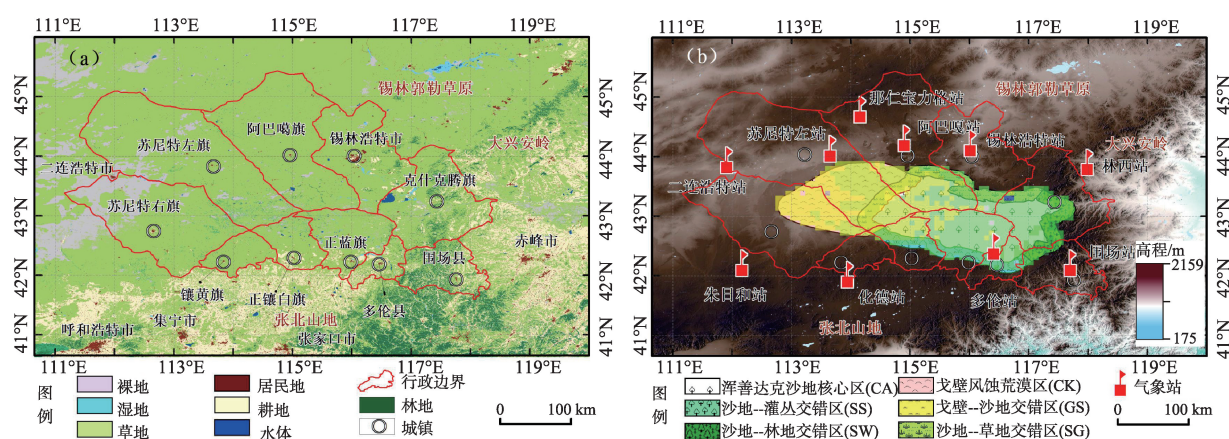


图1 研究区的景观格局:(a)行政区划与土地利用;(b)生态分区与气象站点

Figure 1 Landscape pattern of the study area: (a) Administrative divisions and land use; (b) Ecological divisions and meteorological stations

多年型草本植物为主,发育着疏林、灌丛和草甸,包括榆、柳蒿灌丛、小叶锦鸡儿等^[15]。其中榆树是浑善达克沙地的建群种和优势种,榆树疏林草地在浑善达克沙地成缀块状分布,形成类似于“萨王那”的生态景观^[17],对于该区域生态系统的整体性和多样性维持以及防风固沙等方面具有重要意义。

浑善达克沙地位于东亚季风的边缘地带,常年干旱、强风和低温^[9]。核心区年平均气温 $1.3\sim 5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 $35.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冬季有180 d的冰雪天气,漫长而寒冷,夏季凉爽,温差较大,无霜期100~110 d;全年8级以上大风60~80次,年均风速为 3.5 m/s ;年蒸发量1643~2969 mm,年均降水量365 mm,从东南的400 mm向西北递减至200 mm,80%的降水集中在7—9月份。气温分布和降水分布基本一致,由东南部向西北气温逐渐降低^[22]。

2.2 生态背景区和交错区

为了避免对浑善达克沙地生态的片面解读,本文除了重点研究浑善达克沙地核心区外,还设置了戈壁风蚀荒漠区(Check Area, CK),用以检查NDVI数据的稳定性。再将核心区外推20 km形成了4个生态交错区,其特征描述见表1。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

3.1.1 遥感数据




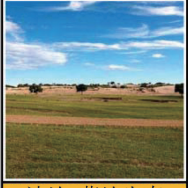
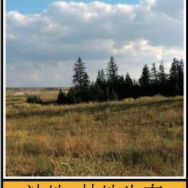
目前时序最长的Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) AVHRR 8 km Nor-

malized Difference Vegetation Index NDVI3g v1.0 (1981—2015年)数据,是GIMMS NDVI3g v0 (1981—2013年)数据的加长版(<ftp://ftp.glcfc.uniacs.umd.edu/glcfc/GIMMS/>),时长达34 a。空间分辨率为 $0.083^{\circ}\times 0.083^{\circ}$,时间分辨率为15 d。该数据集的制作经过了严格的辐射校正、几何校正、去云及剔除坏线处理,确保了数据质量^[47,48];相比其他NDVI数据集,该数据集具有时间序列长、精度高、误差小的优点,在全球及区域植被变化研究中具有很好的适用性^[49-51]。本文采用最大值合成法(The Maximum Value Composite, MVC)获取1982—2015年逐月NDVI数据,共计408幅影像;参照已有研究,再利用平均值合成法(Average Value Composites, AVC)得到年内、年际NDVI数据集^[52]。

由于单一数据可能存在异常,容易造成误判,故本文引用验证数据进行数据一致性检验。验证数据为中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)MODIS NDVI (MOD13Q1)产品(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>),该产品被认为是GIMMS AVHRR NDVI数据的有效补充^[49],成像时间是2000年至今,时间分辨率为16 d,地面分辨率为1 km。通过重采样,对2000—2015年时序重叠部分的MODIS NDVI和GIMMS NDVI进行相关性分析,实施NDVI变化趋势一致性检验(图2)。

两种数据相关性较高且显著:戈壁风蚀荒漠区 $r=0.733(P\text{值}<0.001)$,戈壁—沙地交错区 $r=0.626(P\text{值}$

表1 浑善达克沙生态交错区景观特征与环境背景

| 交错区 | 地理位置 | 行政隶属 | 景观类型 | 土壤类型 | 植被类型 | 气候特征 |
|---|---|--|---|---|---|---|
|  戈壁风蚀荒漠区(CK) | 浑善达克沙地以西,戈壁风蚀荒漠区,区域面积1.380万km ² | 内蒙古自治区 苏尼特左旗、 苏尼特右旗、 二连浩特市 | 极重度和重度荒漠戈壁区,分布砾石荒漠 | 纯沙性母质土壤,土壤含水量少,抗风蚀能力弱,不宜植被发育生长,荒漠草原覆盖度小 | 草场类型属砾石荒漠。戈壁针茅草原 | 气候类型为温带半干旱—干旱大陆性季风气候,冬季寒冷,夏季炎热,全区风力强劲,是大陆性季风的风力通道 |
|  戈壁-沙地生态交错区(GS) | 浑善达克沙地西边缘,戈壁-沙地生态交错地带,区域面积0.2827万km ² | 内蒙古自治区 苏尼特右旗、 阿巴嘎旗 | 沙地和重度荒漠区之间,是戈壁荒漠向干旱草原的过渡地区。分布地势平缓的移动沙丘和风积沙丘 | 土壤为干草原淡栗钙土 | 草场类型属荒漠草原和干旱草原。旱生丛生小禾草为主,植被覆盖度介于沙地和重度荒漠区之间 | 气候类型同为温带半干旱—干旱大陆性季风气候,冬季寒冷,夏季炎热,是大陆性季风的风力通道 |
|  沙地-灌丛生态交错区(SS) | 浑善达克沙地南边缘,沙地-燕山北麓低山灌丛过渡带,区域面积0.4723万km ² | 内蒙古自治区 正镶白旗、正蓝旗、镶黄旗、 多伦县,河北省 围场满族蒙古族自治县 | 中度荒漠化山地草原,接壤燕山山麓隆起区,分布半固定沙丘、丘陵山地 | 土壤以含灌木层片的荒漠草原棕钙土为主 | 草场类型为低山草甸和温带草原沙生系列植物组成了沙地植被主体,伴有少量的榆、柳、桦等灌木 | 沙地干旱—半干旱的气候特征在一定程度上决定了该地区生态环境的脆弱性及气候变化的敏感性 |
|  沙地-草地生态交错区(SG) | 浑善达克沙地北边缘,沙地-锡林郭勒干旱草原过渡带,区域面积0.4298万km ² | 内蒙古自治区 阿巴嘎旗、克什克腾旗、 锡林浩特市 | 荒漠化草原,地形以平原和低山丘陵为主,分布半固定沙丘 | 土壤为草甸草原棕栗钙土 | 草场类型为草甸草原和温带草原。沙生植被,丛生禾草、枣根茎禾草(针茅、羊草)等 | 属中温带半干旱、干旱大陆性季风气候,该区大部分处于中国季风边缘地区、中国东北样带内 |
|  沙地-林地生态交错区(SW) | 浑善达克沙地东边缘,沙地-大兴安岭森林过渡带,区域面积0.3732万km ² | 内蒙古自治区 克什克腾旗、 河北省围场满族蒙古族自治县 | 中、轻度荒漠化稀树草原,分布固定沙丘,山地景观 | 土壤类型为草甸栗钙土或暗栗钙土 | 低山丘陵交会地带,地形多丘陵、高平原与宽谷平原,山间分布草甸草原和林间草地 | 地处内蒙古高原、大兴安岭山脉和阴山山脉结合部,中温带大陆性季风气候区 |

<0.01),沙地核心区 $r=0.671$ (P 值<0.01),沙地-草地交错区 $r=0.880$ (P 值<0.001),沙地-灌丛交错区 $r=0.768$ (P 值<0.001),沙地-林地交错区 $r=0.617$ (P 值<0.01)。MODIS NDVI反映的研究区植被生长状况与GIMMS NDVI具有显著的一致性。

3.1.2 气候和辅助数据

(1)本文采用了两种气候数据。①站点实测数据用于气候变化分析,即1982—2015年标准值年值气象数据,源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),该数据集的时间分辨率

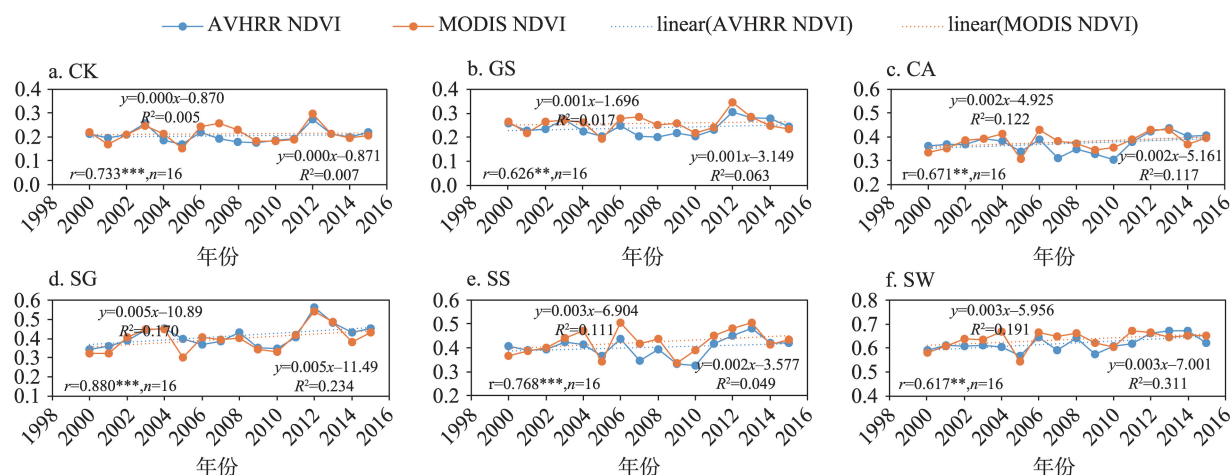


图2 2000—2015年各生态分区的GIMMS NDVI与MODIS NDVI的一致性检验

Figure 2 Consistency test of GIMMS NDVI and MODIS NDVI in each ecotone, 2000-2015

为1a,包括日照时数、最大风速、气压、极端最低气温等要素,本文主要选用气温和降水年值两个要素。②高时间分辨率的栅格气象数据用于NDVI气候响应分析,即1979—2018年中国气象驱动数据集(<http://data.tpc.ac.cn>),该数据集的空间分辨率为 0.1° ,时间分辨率为3 h,是以国际上现有的Princeton再分析资料、GLDAS资料、GEWEX-SRB辐射资料,以及TRMM降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。精度介于气象局观测数据和卫星遥感数据之间,好于国际上已有再分析数据的精度^[53]。

(2)土地利用类型数据为国家基础地理信息中心发布的2010年全球30 m地表覆盖数据产品(GlobeLand30, DOI:10.11769/GlobeLand30.2010.db)。

(3)DEM高程数据采用美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的90 m水平分辨率,10 m垂直分辨率数字高程模型(The Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)SRTM3 DEM(v4.0)(<ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/>);成图边界选用中国1:25万基础地理信息数据。

(4)人口及放牧羊只和大牲畜(主要为牛、马、骆驼)数据。收集并查阅了内蒙古自治区和河北省部分旗(县)经济年鉴资料^[54,55],统计出影响各区域NDVI的旗县1986—2015年的人口数据及放牧数据。

(5)夜光数据。中国1984—2015年长时间序列逐年人造夜间灯光数据集(A Prolonged Artificial Nighttime-light Dataset of China, PANDA)是由2021

年清华大学张立贤等采用夜间灯光卷积长短期记忆网络法计算得到,并在国家青藏高原数据中心(<http://data.tpc.ac.cn/>)发布的夜间灯光遥感数据集。模型与原始图像的模型评估显示,均方根误差(RMSE)达到0.73,决定系数(R^2)达到0.95,像素级的线性斜率(Slope)为0.99,表明生成产品的数据质量较高^[56]。

3.2 研究方法

3.2.1 数据合成

NDVI影像的数据处理方法通常有3种:最大值合成(Maximum Value Composites, MVC)、平均值合成(Average Value Composites, AVC)和总值合成(Sum Value Composites, SVC)。最大值处理消除了云、雾等自然条件对NDVI值的影响;平均值处理可消除异常分布对NDVI值的影响;总值处理可反映植被在某时间段内的生物积累量^[57]。本研究区自然条件恶劣、沙地植被覆盖度低且分布极不均匀,故在最大值半月合成数据的基础上,进一步采用了均值合成的方法。其计算方法如下:

(1)月合成(Monthly Composites, MC)是求上、下半月最大值合成数据的均值,计算公式如下:

$$mNDVI_j = \frac{1}{2} \max_{j=1}^{12} (NDVI3g(a), NDVI3g(b)) \quad (1)$$

式中: j 表示月序号,取值范围为1~12; $mNDVI_j$ 表示第 j 月的最大NDVI值; $NDVI3g(a)$, $NDVI3g(b)$ 分别表示第 j 月上半月和下半月的NDVI值。由此获得1~12月份的NDVI年内数据。

(2)年合成(Annually Composites, AC)是对1~

12月的NDVI最大值做区域平均计算,得到1982—2015年逐年平均NDVI值。计算公式为:

$$aNDVI_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} (mNDVI_{ij}), (i=1982, 1983, \dots, 2015) \quad (2)$$

对采用AVC法的半月合成产品GIMMS NDVI3g v1.0,进行月平均值(年内)合成和年平均值(年际)合成,获得1982—2015年408期月均值和34期年均值图像文件,分别用于戈壁风蚀荒漠区、4种过渡类型区、沙地核心区的年内和年际分析。

3.2.2 趋势分析

一元线性趋势分析法(Univariate Linear Trend Analysis)能模拟每个栅格(像素)的变化趋势,反映不同时期NDVI变化趋势的空间特征。研究34年NDVI3g v1.0随时间序列变化趋势,便于对研究区未来的生态环境状况进行预测。包括逐像元分析和区域分析,利用所有年份的数据进行拟合,避免了研究结果的随机性和偶发性,其结果可以更加准确地反映植被的生长状况和变化趋势^[58]。其计算公式为:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NDVI_i) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n NDVI_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式中: θ_{slope} 为NDVI回归方程的斜率; n 为监测年数; $NDVI_i$ 为第 i 年的年NDVI均值; 当 $\theta_{slope} > 0$ 时,表示随时间变化所在像元植被指数上升,植被覆盖度呈增加趋势;反之,植被指数呈下降趋势。

3.2.3 变异分析

变异系数(Coefficient of Variation, Cov),又称“离散系数”,可以表示地理数据的相对变化(波动)程度^[59]。 Cov 是基于每个像元34年的NDVI增值变化计算得出的,它的优点是不需要参照平均值,可以消除测量尺度和量纲的影响。其计算公式为:

$$Cov = \frac{1}{\overline{NDVI}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{NDVI})^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中: Cov 为第 i 年 $NDVI_i$ 变异系数; \overline{NDVI} 为34年NDVI平均值; Cov 值越小,表明NDVI波动越小; Cov 值越大,表明NDVI波动越大。

3.2.4 相关分析

相关性分析是指对存在一定联系的两个或多个具备相关性的变量元素进行线性分析,并评价两

个变量因素的密切程度的统计方法。两个变量的关系可以直观地用散点图表示,当其紧密地群聚于一条直线的周围时,变量间存在强相关性^[60]。

本文对戈壁风蚀荒漠区、沙地区和4个交错区GIMMS NDVI3g v1.0与气温、降水、灯光亮度、人口、放牧量两两进行相关分析,确定变化趋势的显著性,对植被变化未来趋势进行预测。相关系数(Correlation coefficients, r)表达式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: r_{xy} 为变量 x 、 y 的相关系数; x_i 、 y_i 为两个变量 x 、 y

第 i 年的值; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。

4 结果与分析

4.1 物候变化分析

为了获得植被生长期多年动态,将研究区34a的1—12月份 $mNDVI$ 利用插值算法制成晕渲图,结合当地“一年一熟”的物候特点,植被的生长周期包含返青期 SOS (Start of Growing Season),生长期 LOS (length of Growing Season) 和枯黄期 EOS (End of Growing Season)。春季NDVI曲线陡升标志生长季起始,此时的初始值作为生长期开始阈值,秋季NDVI曲线脱离稳定状态陡降标志生长季结束,其值作为生长期结束阈值(图3)。

本文的6个子区主要植被覆盖区别很大,经过对晕渲图反复推敲,并结合当地物候实况,最终确定返青期和枯黄期的动态阈值分别为:戈壁风蚀荒漠区 $\tau=0.15$ 、戈壁-沙地生态交错区 $\tau=0.15$ 、沙地核心区 $\tau=0.20$ 、沙地-草地生态交错区 $\tau=0.20$ 、沙地-灌丛生态交错区 $\tau=0.25$ 、沙地-林地生态交错区 $\tau=0.25$ 。

通过动态阈值法求取植被返青期和枯黄期,结果见图4。

测算可得,6区返青期(SOS)分布在一年中的第119~130天(Day of Year,简称DOY),东侧早于西侧进入返青期,枯黄期集中在一年中的288~310DOY,东侧迟于西侧进入枯黄期,生长期持续在158~196d之间(图4)。对比同类研究,虽然采用数据类型和提取方法各异,但研究结果具有较高一致性(表2)。

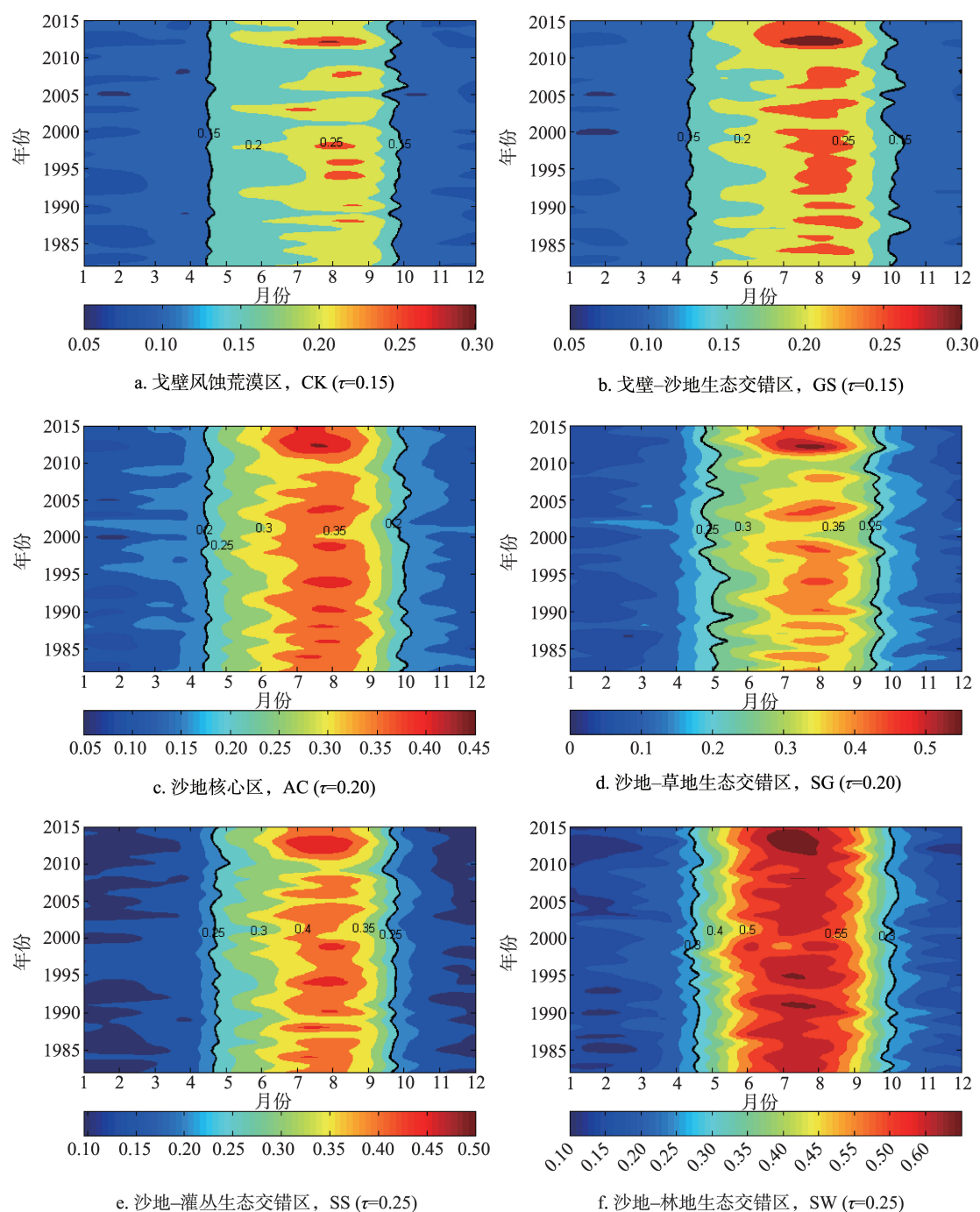


图3 1982—2015年浑善达克沙地时间序列月NDVI插值图

Figure 3 Interpolation of time series monthly NDVI (mNDVI) in the Hunshandake Sandy Land, 1982-2015

具体到各个生态分区:①沙地-林地生态交错区水热条件均优于其他区域,34 a返青期平均值为119 DOY,生长期持续196 d;②戈壁风蚀荒漠区水热环境最为恶劣,返青期均值为130 DOY,生长期持续158 d;③戈壁-沙地生态交错区返青期为124 DOY,生长期持续183 d;④沙地核心区返青期为

124 DOY,持续生长190 d;⑤沙地-灌丛生态交错区返青期为125 DOY,持续生长185 d;⑥沙地-草地生态交错区受人类活动影响较多,返青期为129 DOY,持续生长180 d。

4.2 NDVI时间变化分析

为了探究1982—2015年研究区NDVI时间序

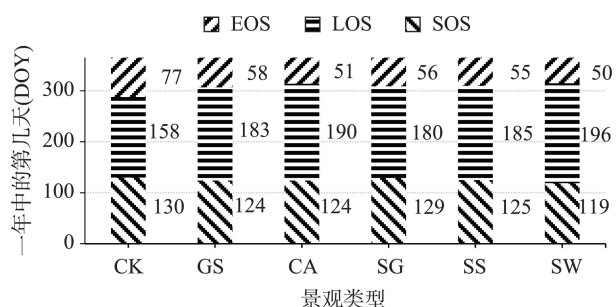


图4 浑善达克沙地各生态区返青期、枯黄期和生长季长度
Figure 4 Start of growing season (SOS), end of growing season (EOS), and length of growing season (LOS) of ecoregions in the Hunshandake Sandy Land

列变化趋势,对浑善达克沙地6个子区 $aNDVI$ 年均值,利用线性倾向估计($Slope$)进行植被覆盖度时间趋势分析(图5)。

其规律表现如下:

(1)如图5所示,1982—2015年,浑善达克沙地6个子区植被覆盖度呈现轻微增加趋势,其增长斜率($Slope$)极低。

各区域 $aNDVI$ 年际波动很大,分别为戈壁风蚀荒漠区(0.0001/10a)<核心区(0.0002/10a)<沙地-灌丛生态交错区(0.0004/10a)<戈壁-沙地生态交错区(0.0008/10a)<沙地-林地生态交错区(0.0009/10a)<沙地-草地生态交错区(0.0017/10a),增长趋势均未达到显著水平,且无明显线性特征。

(2)6区的植被类型相差较大,且从东南向西北

$aNDVI$ 逐渐降低。

水热条件较好的沙地-林地生态交错区(SW)NDVI均值最高,1982—2015年 $aNDVI$ 均值为0.3447;沙地-灌丛生态交错区(SS)位列第二, $aNDVI$ 均值为0.2450;沙地核心区(CA)和沙地-草地生态交错区(SG)的 $aNDVI$ 均值分别为0.2214和0.2151;植物群落丰富度和集中度较差的戈壁风蚀荒漠区(CK) $aNDVI$ 均值仅为0.1495;戈壁-沙地生态交错区(GS)为0.1661。

上述结果在2000—2015年期间,与MODIS NDVI升尺度数据处理的结果是一致的(图2)。戈壁风蚀荒漠区(CK)植被相较于其他研究区生长稳定性最好,但增长速率也最缓慢。值得注意的是,沙地-草地生态交错区(SG)毗邻锡林郭勒草原,属沙地-典型草原交错区,近年来当地重点生态工程的实施,例如人工牧场(草库伦)的建立,也对环境稳定具有显著的正向作用^[15]。该区域NDVI增长率(0.0017/10a)高于其他区域2~17倍。

4.3 NDVI空间变化分析

为了进一步把脉1982—2015年整个研究区范围内的植被覆盖度时空变化特征,对研究区NDVI进行逐像元变异分析和趋势分析。

(1)Cov变异分析

由于地貌差异、植被类型不同、土壤类型制约,加之人类土地利用对自然的干扰,单靠植被指标的

表2 本文的物候研究结果与其他模拟结果的比较

Table 2 Comparison of the extracted phenology in this study with other simulation results

| 方法 | 研究区 | 数据类型 | 年份 | SOS/DOY | EOS/DOY | LOS/d | 文献 |
|------------------|----------|----------------|-----------|---------|---------|---------|------|
| Logistic 曲线曲率极值法 | 蒙古高原 | GIMMS NDVI3g | 1982—2011 | 105~140 | 266~276 | 125~175 | [61] |
| 动态阈值法 | 内蒙古荒漠草原区 | MODIS NDVI/EVI | 2000—2017 | 120~130 | 290~300 | 170~180 | [62] |
| Logistic 曲线曲率极值法 | 内蒙古草原生态区 | MODIS NDVI/EVI | 2001—2016 | 128 d | 269 d | 141 | [63] |
| 动态阈值法 | 内蒙古 | GIMMS NDVI3g | 1982—2013 | 120~160 | 275~295 | 120~170 | [64] |
| NDVI 变化率法 | 中国温带 | GIMMS NDVIg | 1982—2006 | 110~135 | 279~284 | 140~180 | [65] |
| 动态阈值法 | 中国北方草地 | GIMMS NDVI3g | 1983—2015 | 100~130 | 245~290 | 100~140 | [66] |
| 动态阈值法 | 浑善达克沙地 | MODIS NDVI/EVI | 2000—2019 | 110~140 | 250~280 | 120~170 | [67] |
| 动态阈值法 | 浑善达克沙地全区 | GIMMS NDVI3g | 1982—2015 | 119~130 | 288~310 | 158~196 | 本文 |
| 动态阈值法 | 生态校验区 | GIMMS NDVI3g | 1982—2015 | 平均130 | 平均288 | 平均158 | 本文 |
| 动态阈值法 | 沙地-戈壁过渡区 | GIMMS NDVI3g | 1982—2015 | 平均124 | 平均307 | 平均183 | 本文 |
| 动态阈值法 | 沙地核心区 | GIMMS NDVI3g | 1982—2015 | 平均124 | 平均314 | 平均190 | 本文 |
| 动态阈值法 | 沙地-草地过渡区 | GIMMS NDVI3g | 1982—2015 | 平均129 | 平均309 | 平均180 | 本文 |
| 动态阈值法 | 沙地-灌丛过渡区 | GIMMS NDVI3g | 1982—2015 | 平均125 | 平均310 | 平均185 | 本文 |
| 动态阈值法 | 沙地-森林过度区 | GIMMS NDVI3g | 1982—2015 | 平均119 | 平均315 | 平均196 | 本文 |

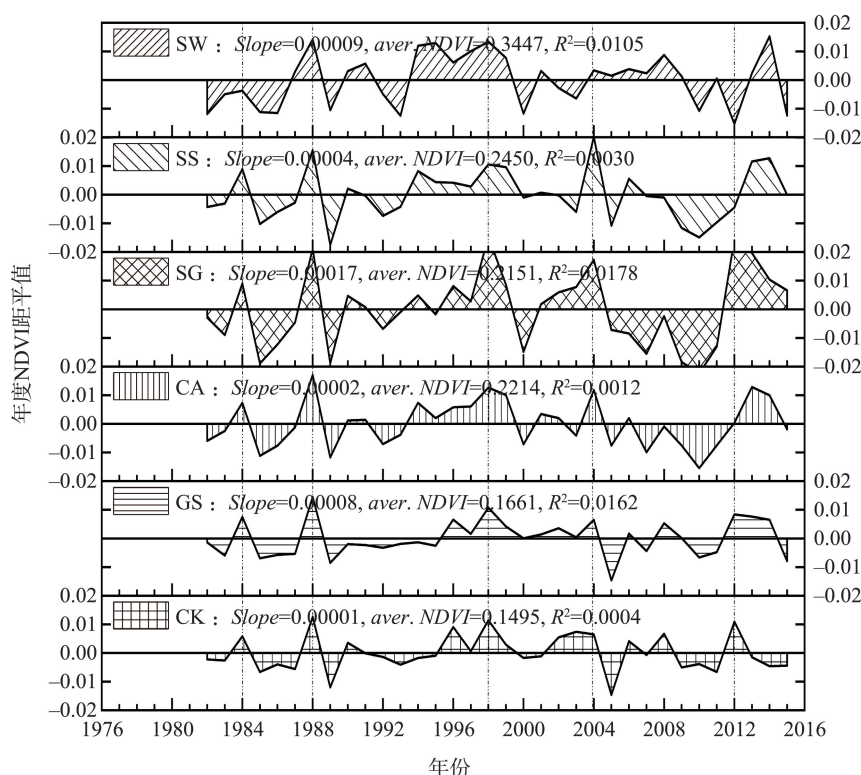


图5 1982—2015年浑善达克沙地及周边NDVI距平变化趋势图

Figure 5 Trend of the anomaly of annual NDVI (aNDVI) in the Hunshandake Sandy Land, 1982-2015

变化难以量化表达,以10 a为步长进行变异系数(Cov)的分段分析,有助于认识34年来浑善达克沙地阶段性植被覆盖度变化特征(图6)。

从图6可以看出,变异系数的阶段性表现为:

(1)戈壁风蚀荒漠区(CK)和戈壁-沙地生态交错区(GS)环境恶劣,植被覆盖度低($aNDVI$ 均值分别为0.150、0.166),1982—1991年、1992—2001年、2002—2011年、2012—2015年四阶段变异系数均较大,分别为戈壁风蚀荒漠区Cov: 0.053、0.042、0.059、0.060,戈壁-沙地生态交错区Cov: 0.050、0.036、0.051、0.055。

(2)沙地-林地生态交错区(SW)34年 $aNDVI$ 均值大于0.345,植被覆盖度较高,变异系数最小(Cov分别为0.035、0.038、0.033、0.045)。

(3)变异系数最大的两个区域是沙地-草地生态交错区(SG)和沙地-灌丛生态交错区(SS),它们分别毗邻燕山北麓和锡林郭勒草原,Cov分别为沙地-灌丛生态交错区(SS)0.046、0.031、0.062、0.053,沙地-草地生态交错区(SG)0.063、0.054、0.071、

0.049;

4)沙地核心区(CA)34年 $aNDVI$ 均值为0.221,四阶段变异系数Cov: 0.046、0.039、0.050、0.042,植被指数变化剧烈的程度要小。

(2) Slope趋势分析

逐像元对浑善达克沙地34年NDVI变化进行趋势分析,结果如图7所示,1982—2015年间研究区 $aNDVI$ 整体以0.00021/10 a的速率增长,逐像元求得的各研究区植被覆盖度变化趋势和GIMMS NDVI年际变化分析结果基本一致(即,戈壁风蚀荒漠区0.00013/10 a<核心区0.00028/10 a<沙地-灌丛交错区0.0005/10 a<沙地-荒漠交错区0.00081/10 a<沙地-林地交错区0.00093/10 a<沙地-草地交错区0.00173/10 a)。

各区域内像元变化交错分布,据统计:斜率为负($Slope < 0$)的像元占整个研究区的48%,主要分布在戈壁风蚀荒漠区和沙地-灌丛生态交错区,表明植被稀少、地势变化地区荒漠化程度加剧;斜率为正($Slope > 0$)的面积占52%,主要分布在沙地-草地

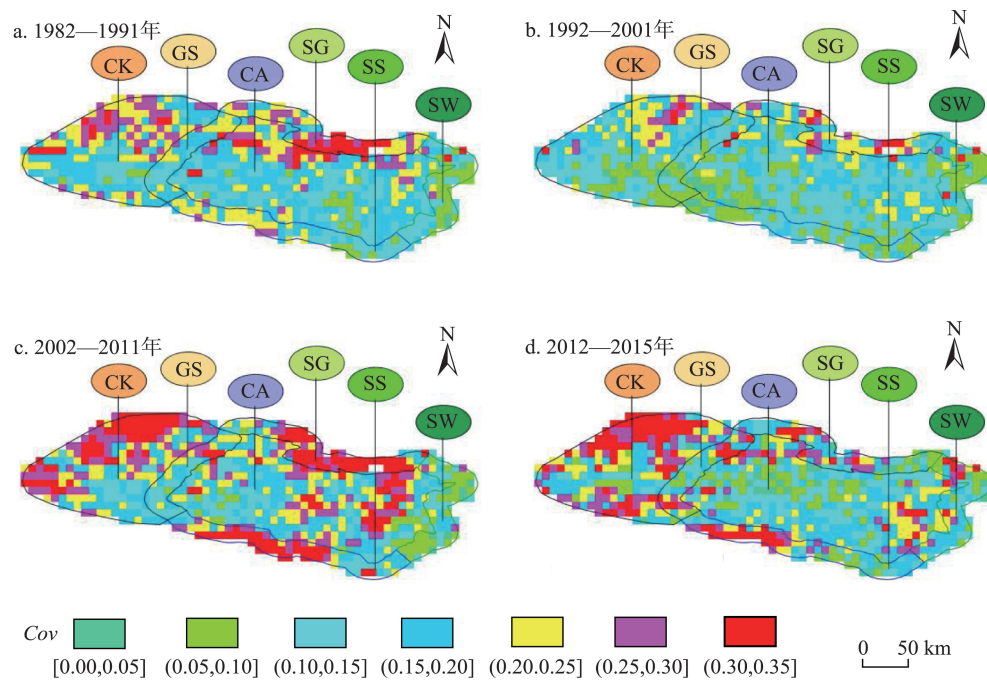


图6 1982—2015年浑善达克沙地植被指数变异系数图

Figure 6 Coefficient of variation of annual NDVI in the Hunshandake Sandy Land, 1982-2015

生态交错区、沙地-林地生态交错区和核心区水源附近,表明植被覆盖度较高,物种丰富度好的区域植被状况稳定。

4.4 气候变化分析

浑善达克沙地及周边交错区空间跨度较大,但地广人稀,站点分布稀疏,本文选取浑善达克沙地

周围10个气象站点(苏尼特左旗、那仁宝力格、阿巴嘎旗、锡林浩特、林西、二连浩特、朱日和、化德、多伦县、围场)数据用于气候分析。进一步通过对34年气温、降水的距平分析,研究该区域气候演化特征(图8)。

图8表明:(1)10个站点年平均气温分别为

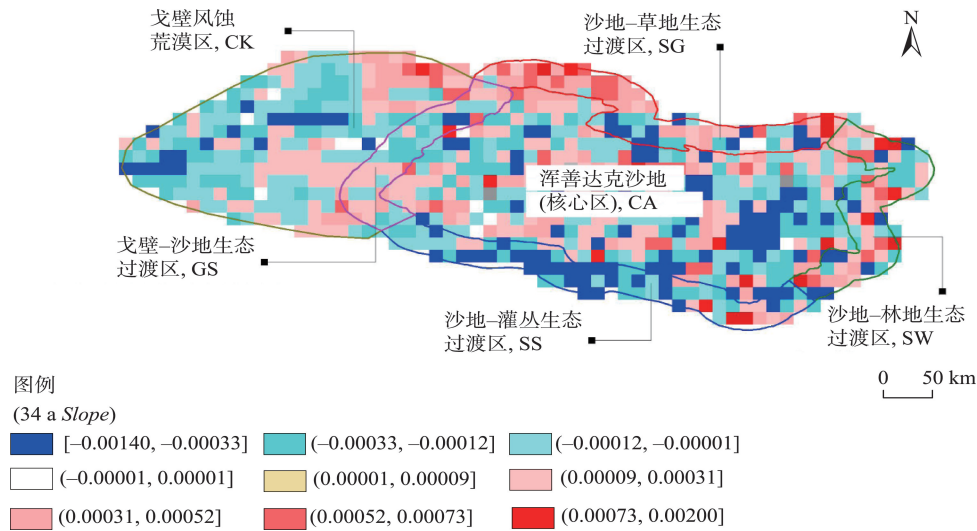


图7 1982—2015年浑善达克沙地植被指数变化趋势

Figure 7 Trend of vegetation cover change in the Hunshandake Sandy Land, 1982-2015

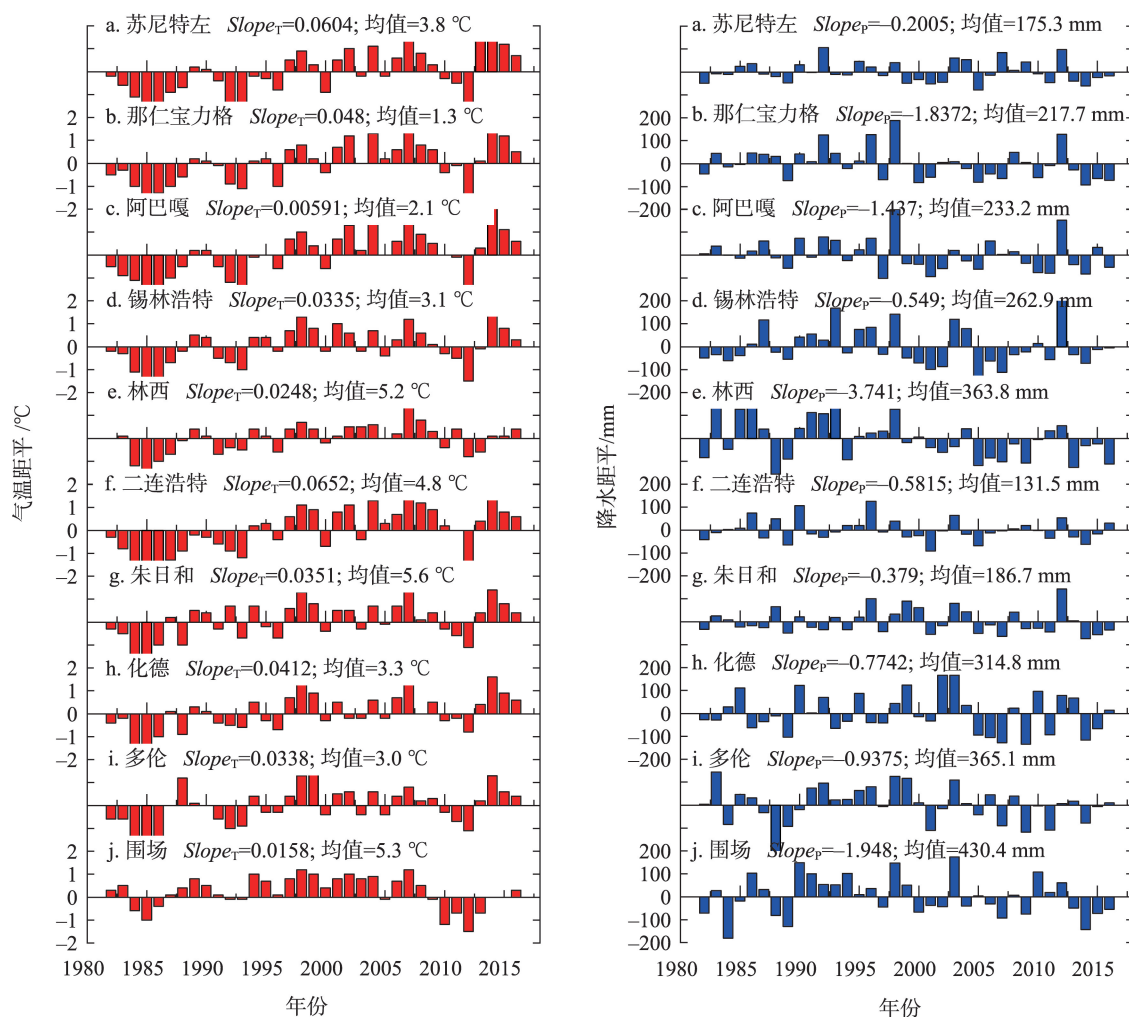


图8 1982—2015年浑善达克沙地周围10个气象站点气温、降水变化

Figure 8 Temperature and precipitation anomalies of 10 meteorological stations around the Hunshandake Sandy Land, 1982-2015

3.8 °C, 1.3 °C, 2.1 °C, 3.1 °C, 5.2 °C, 4.8 °C, 5.6 °C, 3.3 °C, 3.0 °C, 5.3 °C; 年总降水分别为 175.3 mm, 217.7 mm, 233.2 mm, 262.9 mm, 363.8 mm, 131.5 mm, 186.7 mm, 314.8 mm, 365.1 mm, 430.4 mm。可见低温、干旱是这个区域的主要特征。

(2) 10个站点气温上升率分别为 0.0604 °C/a, 0.0480 °C/a, 0.0059 °C/a, 0.0335 °C/a, 0.0248 °C/a, 0.0652 °C/a, 0.0351 °C/a, 0.0412 °C/a, 0.0338 °C/a, 0.0158 °C/a; 降水的变化率分别为 -0.2005 mm/a, -1.8372 mm/a, -1.4370 mm/a, -0.5490 mm/a, -3.7410 mm/a, -0.5815 mm/a, -0.379 mm/a, -0.7742 mm/a, -0.9375 mm/a, -1.948 mm/a。区域总体气温、降水变率分别为 0.036 °C/a, -1.238 mm/a, 该区气候呈暖干化趋势。

5 NDVI变化的驱动分析

5.1 NDVI3g与气候的相关性

浑善达克沙地及周边交错区气候具有季节差异,春季迟缓、夏秋季短暂、冬季漫长,参照本文的物候分析结果和已有研究^[68],将1—4月定义为春季,5—7月定义为夏季,8—10月定义为秋季,11—12月定义为冬季。采用中国区域地面气象要素驱动数据集,利用戈壁风蚀荒漠区、沙地区和4个交错区矢量边界裁剪,计算出1982—2015年期间的逐季平均气温、最高气温、最低气温和逐季累积降水进行变化趋势分析(表3)。

将34年逐季平均NDVI与逐季平均气温、最高气温、最低气温和逐季累积降水进行相关分析,获得各子区NDVI与气候因子的季节相关性(表4)。

表3 1982—2015年浑善达克沙地6个子区NDVI及气候因子的变化趋势

Table 3 Change trend of NDVI and climate factors in six sub-regions of Hunshandak sandy land, 1982-2015

| 季节 | 气象因子 | 景观类型 | | | | | |
|--------------|------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | CK | GS | CA | SG | SS | SW |
| 春季 1—4月 | 降水量 | 0.0902 | 0.0679 | 0.1201 | 0.0683 | 0.0992 | 0.1930 |
| | 平均气温 | 0.0536 | 0.0527 | 0.0486 | 0.0504 | 0.0568* | 0.0429 |
| | 最高气温 | 0.0696 | 0.0664 | 0.0591* | 0.0660* | 0.0548 | 0.0476 |
| | 最低气温 | 0.0140 | 0.0059 | 0.0076 | -0.0036 | 0.0131 | 0.0062 |
| 夏季 5—7月 | 降水量 | 0.0179 | 0.0680 | 0.1821 | 0.1135 | 0.3112 | 0.5339 |
| | 平均气温 | 0.0428* | 0.0405** | 0.0373** | 0.0385** | 0.0381** | 0.0304* |
| | 最高气温 | 0.0647** | 0.0616** | 0.0531** | 0.0606** | 0.0528** | 0.0468** |
| 秋季 8—10月 | 最低气温 | 0.0191** | 0.0200 | 0.0196 | 0.0190 | 0.0247 | 0.0232 |
| | 降水量 | -0.6110 | -0.7194 | -0.7166 | -0.7953 | -0.6105 | -0.9842 |
| | 平均气温 | 0.0456** | 0.0435** | 0.0407** | 0.0428** | 0.0398** | 0.0315** |
| | 最高气温 | 0.0514** | 0.0513** | 0.0460** | 0.0477** | 0.0415** | 0.0328** |
| 冬季 11—12月 | 最低气温 | 0.0318 | 0.0323 | 0.0274 | 0.0311 | 0.0251 | 0.0142 |
| | 降水量 | -0.4482** | -0.4119* | -0.5892** | -0.5144** | -0.5144** | -0.5878** |
| | 平均气温 | 0.2662 | 0.2278 | 0.5380** | 0.4277* | 0.4263* | 0.5652** |
| | 最高气温 | 0.1777 | 0.1123 | 0.4778** | 0.3733* | 0.2762 | 0.5765** |
| | 最低气温 | 0.2647 | 0.2774 | 0.3805* | 0.3158 | 0.4184* | 0.2860 |

注: *表示变化趋势通过95%的显著性检验, **表示变化趋势通过99%的显著性检验。

表4 1982—2015年浑善达克沙地6个子区NDVI与气候因子的季节相关性

Table 4 Correlation coefficient between NDVI and climate factors in six sub-regions of Hunshandak sandy land in different seasons, 1982-2015

| 季节 | 气象因子 | 景观类型 | | | | | |
|--------------|------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | CK | GS | CA | SG | SS | SW |
| 春季 1—4月 | 降水量 | -0.0477 | -0.1320 | -0.1479 | -0.0140 | -0.2136 | -0.3002 |
| | 平均气温 | 0.1592 | 0.3382 | 0.3529* | 0.3087 | 0.2942* | 0.4140* |
| | 最高气温 | 0.1290 | 0.2681 | 0.2242 | 0.2286 | 0.1546 | 0.3269 |
| | 最低气温 | 0.1644 | 0.3361 | 0.3990* | 0.3308 | 0.3547* | 0.3913* |
| 夏季 5—7月 | 降水量 | 0.6925** | 0.3313 | 0.3922* | 0.3967* | 0.4170* | 0.0645 |
| | 平均气温 | -0.1486 | -0.1725 | -0.1622 | -0.0272 | -0.2009 | -0.0473 |
| | 最高气温 | -0.1290 | -0.2209 | -0.0575 | 0.0652 | -0.1371 | 0.1797 |
| | 最低气温 | 0.1752 | 0.1951 | 0.0291 | 0.1135 | -0.0526 | -0.0620 |
| 秋季 8—10月 | 降水量 | 0.4766** | 0.0934 | 0.3427* | 0.3239 | 0.2841 | 0.0106 |
| | 平均气温 | -0.2141 | -0.2062 | -0.1687 | -0.0969 | -0.0403 | 0.2872 |
| | 最高气温 | -0.3772* | -0.1815 | -0.3084 | -0.3197 | -0.1967 | 0.2946 |
| | 最低气温 | 0.1229 | 0.0083 | 0.1272 | 0.1580 | 0.1275 | 0.3161 |
| 冬季 11—12月 | 降水量 | 0.0552 | 0.0615 | 0.0455 | 0.0314 | 0.0156 | 0.0290 |
| | 平均气温 | 0.0230 | 0.0152 | 0.0135 | 0.0150 | 0.0151 | 0.0016 |
| | 最高气温 | 0.0322 | 0.0316 | 0.0297 | 0.0242 | 0.0340 | 0.0205 |
| | 最低气温 | -0.0017 | -0.0080 | -0.0126 | -0.0098 | 0.0016 | -0.0102 |

注: *表示相关性通过95%的显著性检验, **表示相关性通过99%的显著性检验。

结合季节气候相关性和变化趋势的统计分析, 得到如下认识:

(1) 夏、秋两季为浑善达克沙地及周边交错区 NDVI 的高速增长期。浑善达克沙地及周边交错区的植被生长期处于5—10月。夏、秋两季的气温(包括平均气温和最高气温)均呈现增加趋势且显著。

夏、秋两季NDVI与平均气温和最高气温均呈负相关,但相关性不显著。暗示平均气温和最高气温的增加对浑善达克沙地及周边交错区NDVI增长有抑制作用。生长期内的降水在夏季呈增加趋势,在秋季呈下降趋势。NDVI与夏、秋两季的降水量均呈正相关且显著,即夏季降水增加NDVI也增加,秋季降水下降NDVI也下降,NDVI与降水相关性明显。

总体而言,在植被NDVI增长时期内,夏、秋两季的降水是浑善达克沙地及周边交错区NDVI增长的最重要的影响因子,夏、秋季平均气温和最高气温的升高对浑善达克沙地及周边交错区NDVI增长均有抑制作用。

(2)冬、春两季为浑善达克沙地及周边交错区NDVI的停滞时期。

浑善达克沙地夏、秋两季较内地短暂,冬、春两季漫长。从每年的11月一次年的4月,在长达半年的冬春季,1982—2015年间平均气温和最高气温呈显著增加趋势,最低气温也呈增加趋势但不显著。这一时期的NDVI处于生长期外的停滞时期(返青期和枯黄期),虽处于低值,但与气温呈不显著的正相关关系。浑善达克沙地春季降水量呈不显著的增加趋势,冬季降水量呈显著减少趋势。NDVI与春季降水负相关,与冬季降水量呈正相关,但都不显著。

总体而言,浑善达克沙地冬、春两季,气温总体呈升高趋势,冬季降水显著减少,春季降水不显著增加。在霜冻和冰雪的影响下,这一时期植被NDVI处于停滞时期,虽有波动但气候响应均不显著。

5.2 NDVI3g与人类活动的相关性

浑善达克沙地处于中国北方农牧交错带,是传

统的畜牧区,过度放牧或植被建设被认为是近年来土地沙漠化扩展或逆转的直接因素。为了定量分析人类活动对各生态区NDVI的影响,以县级行政区为基本单位进行各人文要素的统计(1986—2015年,行政隶属见图1)。

首先,统计出各分区的面积(各区面积见表1)。其次,计算组成各分区中旗县的面积,得到影响各研究区的旗县面积占比。具体为:

(1)核心区:正蓝旗35.91%、克什克腾旗19.95%、阿巴嘎旗19.64%、苏尼特左旗8.5%、正镶白旗8.24%、多伦县5.08%、锡林浩特市2.68%;

(2)戈壁风蚀荒漠区:苏尼特左旗48.23%、苏尼特右旗42.24%、阿巴嘎旗8.53%、镶黄旗0.95%、正镶白旗0.05%;

(3)戈壁-沙地生态交错区:苏尼特左旗62.82%、阿巴嘎旗31.49%、正镶白旗5.69%;

(4)沙地-草地生态交错区:阿巴嘎旗47.76%、锡林浩特27.34%、克什克腾旗24.89%;

(5)沙地-灌丛生态交错区:正镶白旗40.61%、正蓝旗27.17%、多伦县26.69%、围场4.8%、镶黄旗0.73%;

(6)沙地-林地生态交错区:克什克腾旗77.61%、围场22.37%、多伦县0.01%。

最后,以此为基础,通过各县的统计年鉴^[54,55]和灯光遥感数据,获得了单位面积(km²)各研究区的人文要素:人口/km²、灯光/km²和羊及大牲畜(包括牛、马、骆驼)/km²密度数据,进而获得了NDVI与人口、灯光、绵羊及总食草牲畜单位密度的相关性(表5)。

研究表明,NDVI与各人文要素(人口密度、灯

表5 NDVI值与人类活动的相关系数

Table 5 Correlation coefficient of NDVI and human activity

| 相关系数 (P值) | 戈壁风蚀 荒漠区 | 戈壁-沙地 生态交错区 | 核心区 | 沙地-草地 生态交错区 | 沙地-林地 生态交错区 | 沙地-灌丛 生态交错区 |
|-------------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $r_{NDVI-人口}$ (P值) | 0.002 (0.917) | 0.165 (0.384) | 0.080 (0.674) | 0.094 (0.621) | 0.030 (0.875) | -0.078 (0.682) |
| $r_{NDVI-灯光}$ (P值) | -0.064 (0.738) | -0.034 (0.404) | 0.112 (0.555) | 0.229 (0.223) | -0.014 (0.943) | -0.103 (0.588) |
| $r_{NDVI-羊只}$ (P值) | 0.325 (0.079) | 0.307 (0.098) | 0.315 (0.089) | -0.050 (0.793) | 0.299 (0.108) | 0.420* (0.021) |
| $r_{NDVI-食草牲畜}$ (P值) | 0.323 (0.082) | 0.285 (0.127) | 0.344 (0.063) | 0.013 (0.945) | 0.302 (0.105) | 0.399* (0.029) |

注:*表示在0.05水平显著相关。

2023年1月

光亮度、绵羊密度和总食草牲畜密度)相关性均不高,说明该研究区NDVI变化受人类活动的干扰程度较小,其中仅沙地-灌丛交错区与羊只及总食草牲畜数据呈显著相关,放牧在一定程度上对该研究区NDVI变化具有干扰性。

6 结论

本文采用定性与定量相结合、整体和局部相结合、时间和空间相结合的研究方法,对1982—2015年浑善达克沙地腹地及其生态交错区的植被覆盖度进行了年内分析、年际分析、时空格局分析、气候响应分析、人类活动分析,厘清了浑善达克沙地核心区与交错区植被覆盖度的分布及沙地发展状况与趋势。主要结论如下:

(1)浑善达克沙地腹地及其生态交错区NDVI相差较大,从东南向西北逐渐降低,整体生态脆弱。6个生态区的物候特征有显著差异,34 a平均生长期(LOS)最长196 d,最短为158 d;返青期(SOS)从东部沙地-林地生态交错区最先开始,依次向西到风蚀荒漠区最晚呈现,区域迟滞达11 d;而枯黄期(EOS)在风蚀荒漠区最早出现,由西向东推迟,区域差异达27 d之多。

(2)浑善达克沙地腹地及其生态交错区NDVI历经多期波动,总体呈轻微改善,34 a增长率0.00021/10 a,但既不线性也不显著。沙地植被在20世纪80年代变异系数较低,90年代相对稳定,21世纪前15年正向变异较高。沙地-草地生态交错区和沙地-灌丛生态交错区波动性较大。

(3)浑善达克沙地腹地及其生态交错区34 a气温以0.3℃/10 a的速率波动上升,降水以-14 mm/10 a的速率波动下降,呈暖干化趋势。月度气候相关性分析表明,6个子区的月度NDVI与气温、降水均高度相关,月度NDVI对气温的敏感性高于降水。NDVI与人类活动要素相关性不高,仅部分区域NDVI与放牧密度正相关,但相关性系数不大,显著性水平不高,不足以说明人口密度与放牧密度显著影响NDVI的演化。

为改善干旱区生态环境,国家先后出台了多项涵盖该区域的生态恢复政策,如“三北防护林二期工程”“退耕还林还草工程”“京津风沙源治理工程”和“围封禁牧工程”等。但浑善达克沙地及其生态

交错区的植被变化仍总体响应气候变化,局部响应人类活动。其植被演变特征具有差异性、地带性、边缘性和阶段性,不能一概而论。

参考文献(References):

- [1] Wang X, Zhao X L, Zhang Z X, et al. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010[J]. *Catena*, 2016, 137: 256–268.
- [2] Scuderi L, Weissmann G, Kindilien P, et al. Evaluating the potential of database technology for documenting environmental change in China's deserts[J]. *Catena*, 2015, 134: 87–97.
- [3] United Nations (UN). United Nations Convention to Combat Desertification[DB/OL]. (1994–06–17) [2022–07–28]. <https://www.unccd.int>.
- [4] United Nations Convention to Combat Desertification Secretariat. Zero Net Land Degradation: A Sustainable Development Goal for Rio+20 [N/OL]. (2012–05–23) [2022–07–28]. <https://www.unccd.int/news-stories/press-releases/unccd-calls-rio20-agree-sustainable-development-goal-land>.
- [5] United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development[R/OL]. (2015–09–25) [2022–07–28]. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- [6] United Nations. Ordos Declaration. The Thirteenth Session of the Conference of Parties (COP 13) to the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD)[R/OL]. (2017–09–06) [2022–07–28]. <https://www.unccd.int/official-documents/cop13-1-documents/iccdcop13114>.
- [7] Yang X P, Zhu B, Wang X, et al. Late quaternary environmental changes and organic carbon density in the Hunshandake Sandy Land, eastern Inner Mongolia, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 61(1): 70–78.
- [8] 元志辉, 包刚, 银山, 等. 2000–2014年浑善达克沙地植被覆盖变化研究[J]. *草业学报*, 2016, 25(1): 33–46. [Yuan Z H, Bao G, Yin S, et al. Vegetation changes in Otindag Sand Country during 2000–2014[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(1): 33–46.]
- [9] 孙晓巍, 周亚利, 张岳敏, 等. 浑善达克沙地最老砂层的年龄[J]. *科学通报*, 2019, 64(17): 1844–1858. [Sun X W, Zhou Y L, Zhang Y M, et al. The age of the oldest aeolian sand in the Otindag Sandland[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(17): 1844–1858.]
- [10] Yang X P, Wang X L, Liu Z T, et al. Initiation and variation of the dune fields in semi-arid China: With a special reference to the Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 369–380.
- [11] Gong Z J, Li S H, Sun J M, et al. Environmental changes in Hun-

- shandake (Otindag) sandy land revealed by optical dating and multi-proxy study of dune sands[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 76: 30–36.
- [12] Lancaster N, Yang X P, Thomas D. Spatial and temporal complexity in Quaternary desert datasets: Implications for interpreting past dryland dynamics and understanding potential future changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 301–302.
- [13] Yang X P, Scuderi L, Wang X L, et al. Groundwater sapping as the cause of irreversible desertification of Hunshandake Sandy Lands, Inner Mongolia, Northern China[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America (PNAS)*, 2015, 112: 702–706.
- [14] Yang X, Ding Z, Fan X, et al. Processes and mechanisms of desertification in northern China during the last 30 years, with a special reference to the Hunshandake Sandy Land, eastern Inner Mongolia [J]. *Catena*, 2007, 71(1): 2–12.
- [15] Li D J, Xu D Y, Wang Z Y, et al. The dynamics of sand-stabilization services in Inner Mongolia, China from 1981 to 2010 and its relationship with climate change and human activities[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 351–360.
- [16] Lu H Y, Wang X Y, Wang X Y, et al. Formation and evolution of Gobi Desert in central and eastern Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 194: 251–263.
- [17] Liu X Y, Lai Q, Yin S, et al. Exploring sandy vegetation sensitivities to water storage in China's arid and semi-arid regions[J]. *Ecological Indicators*, 2022, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108711.
- [18] 任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(4): 791–800. [Ren X Z, Li J G, Liu M, et al. Hydrochemical composition of natural waters and its affecting factors in the East Hunshandak Sandy Land[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 791–800.]
- [19] 白雪梅, 春喜, 斯琴毕力格, 等. 近45a内蒙古浑善达克沙地湖泊群的变化[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(5): 1086–1094. [Bai X M, Chun X, Siqin B, et al. Changes of lakes in Hunshandake Sandy Land in the past 45 years, Inner Mongolia[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(5): 1086–1094.]
- [20] 马超, 刘玮玮, 赵鹏飞, 等. 1962–2016年达里诺尔流域水、草退化及气候响应[J]. *地理研究*, 2017, 36(9): 1755–1772. [Ma C, Liu W W, Zhao P F, et al. Wetland and grassland degradation and the response to climate in Dalinor Basin during 1962–2016[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(9): 1755–1772.]
- [21] Tao S L, Fang J Y, Zhao X, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America (PNAS)*, 2015, 112(7): 2281–2286.
- [22] 范敏, 卢奕瞳, 王照华, 等. 浑善达克沙地中部斑块格局影响植物多样性及功能性状[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(1): 51–61. [Fan M, Lu Y T, Wang Z H, et al. Effects of patch pattern on plant diversity and functional traits in center Hunshandak Sandland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(1): 51–61.]
- [23] Su H, Li Y G, Lan Z J, et al. Leaf-level plasticity of *Salix gordejewii* in fixed dunes compared with lowlands in Hunshandake Sandland, North China[J]. *Journal of Plant Research*, 2009, 122(6): 611–622.
- [24] Cao X, Liu Y, Liu Q X, et al. Estimating the age and population structure of encroaching shrubs in arid/semiarid grasslands using high spatial resolution remote sensing imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 572–585.
- [25] Lin D G, Gao Y, Wu Y Y, et al. A conversion method to determine the regional vegetation cover factor from standard plots based on large sample theory and TM images: A case study in the eastern farming–pasture ecotone of Northern China[J]. *Remote Sensing*, 2017, DOI: 10.3390/rs9101035.
- [26] Wu J J, Li Z Y, Gao Z H, et al. Degraded land detection by soil particle composition derived from multispectral remote sensing data in the Otindag Sandy Lands of China[J]. *Geoderma*, 2015, 241: 97–106.
- [27] Wang Z, Deng X Z, Song W, et al. What is the main cause of grassland degradation? A case study of grassland ecosystem service in the middle-south Inner Mongolia[J]. *Catena*, 2017, 150: 100–107.
- [28] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 等. 京津风沙源区不同分区植被覆盖度变化及归因分析[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2895–2905. [Meng Q, Wu Z T, Du Z Q, et al. Variation in fractional vegetation cover and its attribution analysis of different regions of Beijing–Tianjin sand source region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2895–2905.]
- [29] 周炎广, 王卓然, 青达木尼, 等. 浑善达克沙地固定沙丘风蚀坑形态变化及其动力学机制[J]. *科学通报*, 2022, (67): 1–14. [Zhou Y G, Wang Z R, Damuni Q, et al. Morphological changes and dynamic mechanism of blowouts on fixed dunes in the Otindag Sandy Land, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, (67): 1–14.]
- [30] 渠洪杰, 陈英富, 卢晶, 等. 浑善达克沙地最近一次大规模沙化的沉积记录及其光释光年龄[J]. *中国地质*, 2022, 49(3): 1003–1004. [Qu H J, Chen Y F, Lu J, et al. Sedimentary record and OSL age of the latest large-scale desertification in Otindag Sandy Land [J]. *Geology in China*, 2022, 49(3): 1003–1004.]
- [31] 詹瑾, 李玉霖, 韩丹, 等. 放牧对浑善达克沙地丘间低地植被群落及土壤的影响[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 184–191. [Zhan J, Li Y L, Han D, et al. Effect of grazing on vegetation community and soil of lowland in the Hunshandake Sandy Land[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6): 184–191.]
- [32] 罗文蓉, 胡国铮, 高清竹. 草地生态管理下内蒙古草地土壤有机

- 碳库动态研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(12): 1588–1597. [Luo W R, Hu G Z, Gao Q Z. Dynamic study on soil organic carbon reservoir in Inner Mongolia grassland under grassland ecological management[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(12): 1588–1597.]
- [33] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, et al. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 718–728.
- [34] Xiao Y, Xie G D, Zhen L, et al. Identifying the areas benefiting from the prevention of wind erosion by the key ecological function area for the protection of desertification in Hunshandake, China [J]. Sustainability, 2017, DOI: 10.3390/su9101820.
- [35] 赵媛媛, 武海岩, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地土地沙漠化研究进展[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 101–111. [Zhao Y Y, Wu H Y, Ding G D, et al. A review on the aeolian desertification in the Otindag Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 101–111.]
- [36] 李鸿威, 杨小平. 浑善达克沙地近30年来土地沙漠化研究进展与问题[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 647–655. [Li H W, Yang X P. Advances and problems in the understanding of desertification in the Hunshandake Sandy Land during the last 30 years[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(6): 647–655.]
- [37] 白美兰, 郝润全. 气候变化对浑善达克沙地生态环境演变的影响[J]. 中国沙漠, 2006, (3): 484–488. [Bai M L, Hao R Q. Impact of climatic variation on ecological environmental evolution in Hunshandake Sandland[J]. Journal of Desert Research, 2006, (3): 484–488.]
- [38] 元志辉, 池勇峰, 雷军, 等. 2000–2013年浑善达克沙地植被净初级生产力变化研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 185–199. [Yuan Z H, Chi Y F, Lei J, et al. Variation of vegetation net primary productivity in Hunshandak Sandyland during 2000–2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 185–199.]
- [39] 李春兰, 朝鲁门, 包玉海, 等. 21世纪初期气候波动下浑善达克沙地荒漠化动态变化分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3): 556–565. [Li C L, Chao L M, Bao Y H, et al. Dynamic changes of desertification in the Hunshandake Desert under the climate fluctuation in early 21st century[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(3): 556–565.]
- [40] 陈臻琦, 张靖, 张贻龙, 等. 基于VSD的近20a来浑善达克沙地生态脆弱性变化研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1464–1473. [Chen Z Q, Zhang J, Zhang Y L, et al. Spatio-temporal patterns variation of ecological vulnerability in Otindag Sandy Land based on a vulnerability scoping diagram[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1464–1473.]
- [41] Yue Y J, Li M, Wang L, et al. A data-mining-based approach for aeolian desertification susceptibility assessment: A case-study from Northern China[J]. Land Degradation & Development, 2019, DOI: 10.1002/ldr.3393.
- [42] 申陆, 田美荣, 高吉喜, 等. 浑善达克沙漠化防治生态功能区防风固沙功能的时空变化及驱动力[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 73–82. [Shen L, Tian M R, Gao J X, et al. Spatio-temporal change of sand-fixing function and its driving forces in desertification control ecological function area of Hunshandake, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 73–82.]
- [43] Wang X M, Geng X, Liu B, et al. Desert ecosystems in China: Past, present, and future[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 234: 104206. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104206>.
- [44] 王岳, 刘学敏, 哈斯额尔敦. 荒漠化治理“经济-生态-社会”效益耦合协调度时空分异及其驱动因素: 以毛乌素沙地为例[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1224–1237. [Wang Y, Liu X M, Hasi E E D. Spatiotemporal differentiation and driving factors of coupling coordination degree of economic- ecological- social benefits from desertification control in the Mu Us Sandy Land[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1224–1237.]
- [45] Yang X P, Li H W, Conacher A. Large-scale controls on the development of sand seas in northern China[J]. Quaternary International, 2012, 250: 74–83.
- [46] Li H W, Yang X P. Temperate dryland vegetation changes under a warming climate and strong human intervention—with a particular reference to the district Xilin Gol, Inner Mongolia, China[J]. Catena, 2014, 119: 9–20.
- [47] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8 km NDVI dataset compatible with MODIS and spot vegetation NDVI data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(20): 4485–4498.
- [48] Pinzon J E, Tucker C J. A non-stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g time series[J]. Remote Sensing, 2014, 6(8): 6929–6960.
- [49] Militino A F, Ugarte M D, Pérez-goya U. Stochastic spatio-temporal models for analysing NDVI distribution of GIMMS NDVI3g images[J]. Remote Sensing, 2017, DOI: 10.3390/rs9010076.
- [50] Zhang Y L, Gao J G, Liu L S, et al. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: A case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayas[J]. Global and Planetary Change, 2013, 108: 139–148.
- [51] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth observation based global long term vegetation trends: Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 131–147.
- [52] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982–2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 534–543. [Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982–2013[J]. Acta Geo-

- graphica Sinica, 2019, 74(3): 534–543.]
- [53] He J, Yang K, Tang W J. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 25.
- [54] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古自治区统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1986–2016. [Inner Mongolia Autonomous Region Statistics Bureau. Statistical Yearbook of Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Beijing: China Statistics Press, 1986–2016.]
- [55] 河北省统计局. 河北经济年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1986–2016. [Hebei Provincial Bureau of Statistics. Hebei Economic Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1986–2016.]
- [56] Zhang L X, Ren Z H, Chen B, et al. A Prolonged Artificial Night-time-Light Dataset of China(1984–2020)[DB/OL]. (2020-12-31) [2022-07-28]. <https://data.tpdc.ac.cn/en/data/e755f1ba-9cd1-4e43-98ca-cd081b5a0b3e/>.
- [57] 吴立新, 马保东, 刘善军. 基于SPOT卫星NDVI数据的神东矿区植被覆盖动态变化分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1217–1222. [Wu L X, Ma B D, Liu S J. Analysis to vegetation coverage change in Shendong Mining Area with SPOT NDVI data[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1217–1222.]
- [58] Hird J N, Castilla G, Mcdermid G, et al. A simple transformation for visualizing non-seasonal landscape change from dense time series of satellite data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(8): 1–12.
- [59] Hou X Y, Li M J, Gao M, et al. Spatial-temporal dynamics of NDVI and Chl-a concentration from 1998 to 2009 in the east coastal zone of China: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185: 267–277.
- [60] Liu X F, Zhang J S, Zhu X F, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000–2011[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24: 288–302.
- [61] 包刚, 包玉龙, 阿拉腾图娅, 等. 1982–2011年蒙古高原植被物候时空动态变化[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 866–874. [Bao G, Bao Y L, Alatang T, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation phenology in the Mongolian Plateau during 1982–2011[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5): 866–874.]
- [62] 董晓宇, 姚华荣, 戴君虎, 等. 2000–2017年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响[J]. 地理科学进展, 2020, 39(1): 24–35. [Dong X Y, Yao H R, Dai J H, et al. Phenological changes of desert steppe vegetation and its effect on net primary productivity in Inner Mongolia from 2000 to 2017[J]. Progress in Geography, 2020, 39(1): 24–35.]
- [63] 乌日汗, 红雨, 包刚. 2001–2016年内蒙古植被物候变化及其对生产力的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1685–1693. [Wu R H, Hong Y, Bao G. The change of vegetation phenology and its impacts on vegetation productivity in Inner Mongolia during 2001–2016[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6): 1685–1693.]
- [64] 黄文琳, 张强, 孔冬冬, 等. 1982–2013年内蒙古地区植被物候对干旱变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4953–4965. [Huang W L, Zhang Q, Kong D D, et al. Response of vegetation phenology to drought in Inner Mongolia from 1982 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4953–4965.]
- [65] Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1599–1608.
- [66] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等. 中国北方草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4099–4107. [Qin G X, Wu J, Li C B, et al. Grassland vegetation phenology change and its response to climate changes in North China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4099–4107.]
- [67] 元志辉, 萨楚拉, 银山. 基于MODIS植被指数的浑善达克沙地植被物候变化[J]. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5254–5263. [Yuan Z H, Sa C L, Yin S. Research on vegetation phenological changes in the Otindag Sandy Land based on MODIS NDVI and EVI[J]. China Environmental Science, 2021, 41(11): 5254–5263.]
- [68] 马蓉, 夏春林, 张佳琦, 等. 中国温带草原植被NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2023, 42(2): 395–405. [Ma R, Xia C L, Zhang J Q, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its response to climate change in the temperate grassland region of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(2): 395–405.]

Responses of NDVI evolution to climate change and human activities in the Hunshandake Sandy Land and its ecotones

MA Chao^{1,2,3}, LI Xiaoting¹, XIANG Xiaoming¹, LIU Weiwei⁴, LI Tingting¹

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Key Laboratory of Spatio-temporal Information and Ecological Restoration of Mines (MNR), Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. Research Centre of Arable Land Protection and Urban-Rural High-Quality Development in Yellow River Basin, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 4. Administration of Surveying and Geomatics, Department of Natural Resources of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: [Objective] Understandings of the ecological evolution in the Hunshandake Sandy Land are divergent duo to the differences in study area, data used, and period of study. How the vegetation in the hinterland and marginal ecotones of the Hunshandake Sandy Land interacts with regional climate and responds to human activities remain to be addressed. **[Methods]** In this study, the Gobi desert area was set as the background area (CK), and the Hunshandake Sandy Land and its surrounding areas were divided into a core area (CA) and four ecotones. Based on the long-term GIMMS NDVI3g v1 (1982-2015) dataset, combined with climate data (annual temperature and precipitation) from 1982 to 2015, nighttime light dataset (1984-2015), and population and herbivore data of each banner/county (1986-2015), the correlations between NDVI and climate change and human activities in the CK, CA and the ecotones were analyzed. **[Results]** The results show that: (1) Vegetation phenology was regionally heterogeneous. The length of growing season (LOS) was between 158 and 196 days, and the phenological difference within the region reached 38 days. (2) The change rate of NDVI was spatially different. Total NDVI increased at a rate of 0.00021/10a, while the rate of change in each region varied, with a maximum difference of 17 folds. (3) The response of vegetation to climate variability was zonal. In these ecotones, NDVI change was more sensitive to monthly temperature than to monthly precipitation. (4) The coefficient of variation (Cov) of vegetation went through several stages. The Cov fluctuated little in the 1980s, was relatively stable in the 1990s, and had higher positive variation in the first 15 years of this century. (5) The response of vegetation cover to human activities was not significant. While NDVI was not correlated with population density and nighttime light intensity per square kilometer, it was locally positively correlated with sheep and total herbivorous livestock density per square kilometer. **[Conclusion]** These results suggest that the NDVI of the Hunshandake Sandy Land and its ecotones fluctuated in response to climate change, and although it has improved in this century, it has only reached the level of the mid- to late 1980s.

Key words: ecotones; vegetation phenology; climate change; coefficient of variation (Cov); human activities; Hunshandake Sandy Land