

基于 MODIS 植被指数的浑善达克沙地植被物候变化

元志辉^{1,2,3}, 萨楚拉^{1*}, 银山¹ (1.内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022; 2.内蒙古师范大学, 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022; 3.内蒙古乌兰察布市自然资源局, 内蒙古 乌兰察布 012000)

摘要: 基于近 20a MODIS 的 2 种植被指数数据, 利用 Logistic 曲线曲率极值法和动态阈值法, 对浑善达克沙地植被物候进行了提取, 分析其时空变化, 并利用研究结果数据, 分析植被物候对高程和气象因子的响应。结果表明, 2000~2019 年间研究区的植被物候呈微弱波动趋势, 浑善达克沙地植被返青期 (SOS) 主要集中在 110~140d, 枯黄期 (EOS) 主要集中在 250~280d, 整体呈微弱推迟趋向 (0.28d/a), 生长季长度 (LOS) 主要集中在 120~170d, 整体呈微弱延长趋向 (0.23d/a)。在空间分布上, 占研究区 51.51% 的区域植被 SOS 呈提前趋势; 占研究区 67.02% 的区域植被 EOS 呈提前趋势, 并且占研究区 32.98% 的区域植被 EOS 呈推迟趋势。占研究区 62.71% 的区域植被 LOS 呈延长趋势。在海拔 900~1500m 区间, 随着海拔升高, SOS 显著推迟, EOS 不显著提前, LOS 显著缩短。前一年 11、12 月和当年 1、2、4 月降水量对 SOS 有提前作用, 6、7、8、9 月份气温和降水都对 EOS 推迟有明显的作用。总的来说, 浑善达克沙地植被物候与气候因子的相应规律比较复杂, 表现出季节性的差别及地形的差异性。

关键词: 浑善达克沙地; 物候; 气候; 海拔

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)11-5254-10

Research on vegetation phenological changes in the Otindag sandy land Based on MODIS NDVI and EVI. YUAN Zhi-hui^{1,2,3}, SA Chu-la^{1*}, YIN Shan¹ (1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolian Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 3. The Department of Natural Resources, Wulanchabu 010022, China). *China Environmental Science*, 2021, 41(11): 5254~5263

Abstract: Based on the MODIS NDVI and EVI data in recent 20 years, the vegetation phenology in Otindag sandy land was extracted by using the extreme curvature method of logistic curve and dynamic threshold method, and its temporal and spatial changes were analyzed. The response of vegetation phenology to elevation and meteorological factors was analyzed by using the research result data. The results indicated that the vegetation phenology in the study area showed a slight fluctuation trend from 2000 to 2019. The start of growth season (SOS) was concentrated in 110~140 Julian day, while the end of growth season (EOS) was in 250~280 Julian day and was delayed (0.28d/a). The length of growth season (LOS) was in 120~170 Julian day and was lengthened (0.23d/a). For the trend, SOS was showed a decreasing trend which occupied 51.51% of the total study area. EOS was showed an increasing trend in 32.98% of the study area while the rest decreased. LOS of the area accounted for 62.71% of the study area was showed a prolonged trend. In the altitude range of 900~1500m, SOS was significantly delayed, EOS was not significantly advanced, and LOS was significantly shortened as the altitude increased. The precipitation had an advance effect on SOS in January, February, April and November, December of the previous year. The temperature and precipitation had an obvious effect on the delay of EOS from June to September. On the whole, the responses of phenology to meteorological factors in Otindag sandy land were complex, showing obvious seasonal differences and topographical variability.

Key words: Otindag sandy land; phenology; climate; elevation

北半球中高纬度地区的植被经历了以春季增绿、夏季成熟、秋季衰老和冬季休眠为特征的物候现象^[1], 产生了与之相适应的物候期^[2]。植被物候期参数中的返青期 (SOS) 和黄枯期 (EOS) 的改变直接决定生长季 (LOS) 的长短, 从而决定季节的陆地碳吸收; 植被返青期的提前影响植被生产力的累积^[3]; 植被枯黄期是气象变化的最敏感、最精确的综合指示器。物候被认为具有相当大的潜力来表征生物圈-气候相互作用的强度^[4]。基于遥感监测数据的物候研究已经成熟, 但揭示的物候变化趋势有较大差别。有

研究认为, 秋季变暖是导致北半球中高纬度大多数地区 EOS 呈推迟趋势的最主要原因^[5], 而降水量是改变干旱半干旱区植被 EOS 的最主要原因^[6]。SOS 变化明显的发生原因被认为是春季温度变化趋势的转折^[7], 冬季温度的持续升高^[8]。还有研究表明, 蒙古高原植被 SOS 与季前特别是 3 月份的温度呈负相关, 而与上一年秋冬季的降水呈正相关^[9]。有研究发

收稿日期: 2021-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41861014)

* 责任作者, 教授, sachula@126.com

现^[10],内蒙古植被 EOS 与季前温度均呈正相关关系. 还有研究发现^[11],影响物候的其他主要因素是海拔高低和群落结构的差异.区域尺度上的物候期及其大小、具体位置和驱动机制仍然存在较大的不确定和争议.因此针对性分析具体区域物候变化及其影响因素具有现实意义.

国内已有许多学者利用遥感数据,重点对东北亚^[12]、蒙古高原^[13]、青藏高原^[14]、内蒙古地区^[15]、东北地区^[16]和内蒙古中东部^[17]等地区的植被物候时空变化进行了研究,但对位于京津地区天气系统上游的浑善达克沙地研究较少.其距北京正北的直线距离为 180km,是京津地区北方生态屏障的重要部分,也是影响京津地区北路沙尘暴的必经之地和沙尘源区之一.该区域也是研究陆地生态系统对气候变化响应机制的理想场所.一系列生态恢复工程对浑善达克沙地实施重点治理^[18],使其成为祖国北疆亮丽风景线的绿色生态屏障的一部分.但由于浑善达克沙地研究区范围小,土壤类型单一,植被覆盖率低,而且多以单一数据源、单一拟合方法或单一物候提取方法,很少在该区域使用多种数据源和不同方法综合提取物候参数.可能在一定程度上忽略了小区域尺度的细微变化,从而导致区域尺度上的研究不全面、不丰富和不细致.因此有必要对浑善达克沙地植被物候的年际变化进行综合分析.

在提取物候数据方法方面,已有研究^[19]和前期分析、以及与 Zhang 等^[20]的结果相比表明,归一化植

被指数(NDVI)和的累积 Logistic 曲线曲率极值法在蒙古高原植被区具有较好的物候识别能力,较适合包括浑善达克沙地在内的内蒙古地区植被物候的时空变化分析. Shen 等^[21]认为物候提取用多个数据集应该比使用多个方法具有更高的优先级,因此为了提高物候提取精度,本文又引入了增强型植被指数(EVI),并用利用两种植被指数以及不同方法求平均值作为最终物候提取方法.

浑善达克,是我国四大沙地之一^[22].它横贯内蒙古锡林郭勒盟东西,部分进赤峰市境内和河北省境内(图 1),总面积达 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[23].该沙地自然区划属温带半干旱区的草原地带,温带大陆性季风气候控制,盛行西风.沙地位于典型草原地带之中,海拔 900~1850m,地势由东南向西北缓降,地面起伏不大.广泛分布温带沙漠植被和风沙土^[24].该区域因地面物候观测站点少,时间序列短,相比于内蒙古全境乃至蒙古高原的物候研究更为薄弱.因此,本文基于 2000~2019 年的 MODIS NDVI 和 EVI 数据,利用累积 Logistic 曲线曲率极值法和动态阈值法,对浑善达克沙地植被物候特征指标进行提取,分析其时间变化和空间特征^[25],并利用气象数据,分析在全球气候变化和生态恢复的背景下,植被物候与气象因子和地形海拔的关系,为区域生态系统与环境管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源及预处理

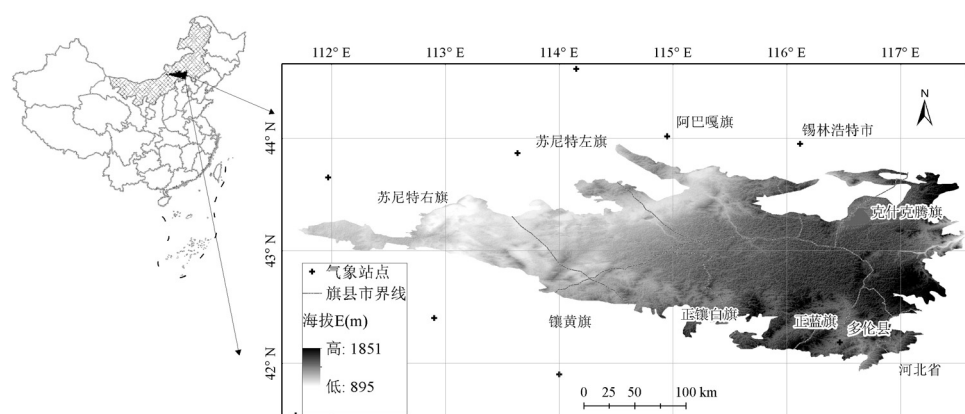


图 1 浑善达克沙地地理位置

Fig.1 Location of the Otindag sandy land

使用 NASA 免费提供的 Tiles 为 h26v04 覆盖浑善达克沙区域的 MOD13Q1 产品;该数据是 2000~

2019 年 16d 的分辨率 250m 的 NDVI 和 EVI 数据^[26]. 为了解裸地和盐碱地等无植被区或植被覆盖度极

低地区的 NDVI 对最终研究结果的影响,在此将多年平均 NDVI 小于 0.1 的地区认为“无植被区”予以排除^[27],最终确定 89.5%的地区进入研究.浑善达克沙地界线来自银山等^[28]的研究结果,结合 Yang 等^[29]的结果适当调整(图 1).研究区涉及的行政区界线来自 1:400 万国家基础地理信息系统数据库.

气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的 2000~2019 年内蒙古及北京境内 15 个气象站的月累积降水量和月平均温度数据,分别在东乌珠穆沁旗、二连浩特、那仁宝力格、满都拉、阿巴嘎旗、苏尼特左旗、朱日和、四子王旗、化德、集宁、西乌珠穆沁旗、锡林浩特、林西、多伦、翁牛特旗、赤峰和密云.对气象数据进行反距离加权法(IDW)空间插值,获取与 NDVI(EVI)数据投影相同、像元分辨率为 250m 的气象数据栅格图像.通过数据掩膜,裁剪浑善达克沙地月降水量、月平均温度数据的栅格图像^[30].地形数据来自地理空间数据云平台,根据研究区范围下载 DEM 数据,然后经过投影转换、数据剪裁得到研究区 ASTERG DEM 数字高程数据,空间分辨率为 30m,主要用于物候与海拔的相关分析.

1.2 研究方法

1.2.1 NDVI(EVI)数据的平滑处理 由于 16d 合成的 NDVI(EVI)数据仍受到降低云、大气、太阳高度角等的干扰,在 NDVI(EVI)数据季节变化曲线中常出现锯齿状现象,不能正确反映年内植被生长和衰退规律^[31].因此,在物候识别之前,首先利用时间序列谐波分析法(HANTS)^[32],对每年 16d 合成的 23 幅 NDVI(EVI)数据进行平滑与重构,尽可能降低原数据中存在的太阳高度角和大气条件等因素的影响.HANTS 方法的核心算法是最小二乘法和傅里叶变换^[33].即通过最小二乘法去除时序 NDVI(EVI)值变化较大的点,再利用傅立叶变换在时间域和频率域的正反变换来实现曲线的分解和重构,以实现时序 NDVI(EVI)数据的平滑.该方法主要确定频率数、数据范围、曲线匹配阈值和删除最大点个数等 4 个参数.其表达式如下:

$$y_i = A_0 \sum_{j=1}^m A_j \sin(\omega_j + \theta_j) (i=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中: A_0 为谐波的余项,等于时间序列的平均值; A_j 为各谐波的振幅; $\omega_j = 2j\pi/N$ 为各谐波的频率; N 为时

间序列的长度; θ_j 为各谐波的初相位; $m = N - 1$ 为谐波个数.

1.2.2 累积 NDVI 的 Logistic 曲线曲率极值法 利用 Hou 等^[34]提出的累积 NDVI 的 Logistic 曲线曲率极值法,在像元尺度上识别研究区植被物候的 3 个主要参数—SOS、EOS 和 LOS.然后利用 Logistic 函数对累积 NDVI 进行拟合(式 2)并计算曲率(式 3),将最大曲率值和最小曲率值对应的时间分别定义为返青期和枯黄期,两者差值即为生长季长度.

$$y(t) = \frac{c}{1 + e^{a+bt}} + d \quad (2)$$

$$K = \frac{dy}{ds} = -\frac{b^2 cz(1-z)(1+z)^3}{[(1+z)^4 + (bcz)^2]^5} \quad (3)$$

式中: $y(t)$ 为儒略日 t 对应的 Logistic 拟合的累积 NDVI 值; d 为背景 NDVI; $c+d$ 为累积 NDVI 的最大值; a 和 b 是拟合参数.

1.2.3 动态阈值法 本文中,应用动态阈值法提取物候.首先,计算了 2000~2019 年平均 EVI 时间序列曲线.然后将 50%和 50%作为 2 个动态阈值,在之前的研究中广泛用于遥感数据提取物候值^[35].以多年中像元上 EVI 最大值与最小值作为输入,将 1~180d 内 EVI_{ratio} 首次高于 0.5 对应的 EVI 时间点定义为 SOS,180~365d 内 EVI_{ratio} 首次低于 0.5 对应的 EVI 时间点定义为 EOS,计算公式如下:

$$EVI_{ratio} = \frac{EVI - EVI_{min}}{EVI_{max} - EVI_{min}} \quad (4)$$

式中: EVI_{ratio} 取值范围为 0~1; EVI 为每日 EVI; EVI_{max} 和 EVI_{min} 是研究时段每个像元 EVI 全年的最大值和最小值.

1.3 趋势分析和相关分析法

采取一元线性回归分析法分析 2000~2019a 浑善达克沙地植被物候的整体变化趋势,单个像元多年回归方程中趋势线斜率即为年际变化率.通过时间序列和植被物候序列的相关关系来判断物候年际间变化的显著性,斜率为正表示物候推迟,反之则表示植被物候提前^[36].

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

式中: s 为趋势斜率,代表物候变化趋势及其大小; x_i 代表第 i 年某一像元的年平均植被物候值, $\bar{x}$ 代表各

指标 20a 平均值; y 代表年份, i 取 2000~2019; n 为监测时间段的年数。地理系统是一种多要素的复杂大系统,特别是在众多要素所构成的地理系统中,其中一个要素的变化必然影响到其他各要素的变化,偏相关分析应由此而生。偏相关分析是指当两个变量同时与第三个变量相关时,将第三个变量的影响剔除,只分析其他两个变量之间相关性的过程^[37]。

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

式中: R_{xy} 为要素 x 与 y 之间的相关系数; n 为样本数; x_i 、 y_i 分别为第 i 年/月某一像元的物候值和年/月均温或年/月降水量值; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为物候多年/月平均值和研究时间段的多年/月均温或月降水量值。

$$r_{123} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2) + (1 - r_{23}^2)}} \quad (7)$$

式中: r_{123} 为变量 3 固定后变量 1 与 2 的偏相关系数; r_{12} 为变量 1 与变量 2 的相关系数; r_{13} 为变量 1 与变量 3 的相关系数; r_{23} 为变量 2 与变量 3 的相关系数。 $r_{123} > 0$ 表示正相关; $r_{123} < 0$ 表示负相关,相关系数越大,说明 2 个要素之间的相关性越强^[30]。如果 r_{123} 值通过 0.05 的显著性水平,则认为两个要素之间显著的正或负相关。

2 结果与分析

2.1 浑善达克沙地植被物候空间格局和总体变化趋势

从图 2(a)可以看出,研究区平均 SOS 出现在第 90~150d,仅 0.12% 的区域晚于第 145d。大部分集中于第 110~140d(87.53%),即 SOS 主要出现在 4 月下旬~5 月下旬,平均为 127d。空间分布自西向东逐渐增大,返青期最早的地区主要位于苏尼特右旗东部,即研究区的西部地区,一般集中在 90~105d(4.32%)。而 SOS 较晚的区域主要分布多伦县和河北境内,即研究区的东北角区域, SOS 值分布在 140~150d(4.92%),表明水汽条件好的区域返青更晚。多年平均 EOS 出现在第 240~290d,仅 2.13% 的区域早于第 250d。大部分集中在第 250~280d(96.94%),即 EOS 主要出现在 9 月上旬~10 月上旬,平均为 265d。空间分布呈中部高东西低, EOS 较晚的区域位于苏尼特左旗境内(图 2(b)),即研究区的北部区域, EOS 值分布在 275~

290d(4.86%)。从图 2(c)可以看出,浑善达克沙地平均生长季长度(LOS)出现在 100~180d,仅 0.25% 的区域早于 100d。大部分集中在 120~170d(92.74%),平均为 138d,基本与 EOS 具有相同的空间分布规律。

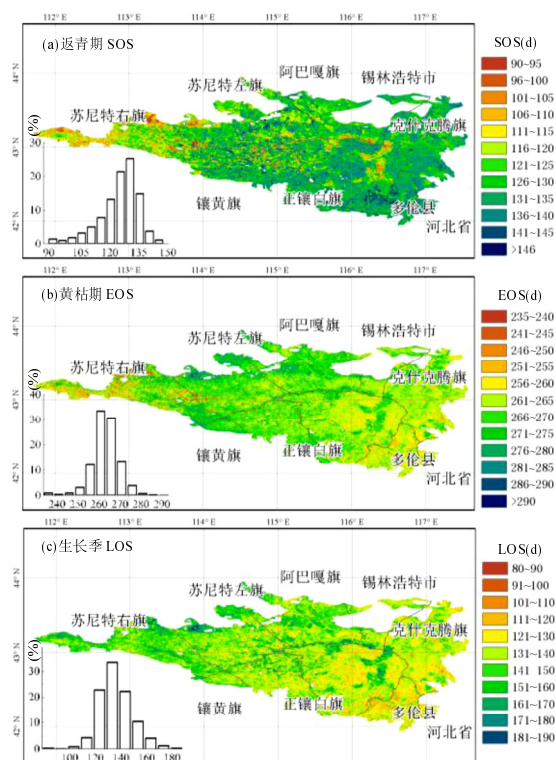


图 2 20 年间浑善达克沙地物候的空间分布及面积百分比

Fig.2 Spatial distribution and area percentage of average SOS、EOS and LOS in the Otindag sandy land in recent 20 years

图中南侧柱状图代表不同物候值所占面积百分比

从近 20a 的年际变化趋势看(图 3), SOS 几乎没有变化, EOS 和 LOS 都呈现微弱推迟趋势,但变化均不显著。相对 EOS 趋势更明显,近 20a 变化幅度约 10d(斜率为 0.28d/a)。20a 平均 EOS 值约为 264.8d, EOS 值 2002 年最低,约为 255d,低于多年平均值 3.69%,研究显示浑善达克沙地 2002 年是近 20 年里生长季气温最高、降水最少的 1a^[38]。2016 年最高,约为 271.2d,高于多年平均值 2.42%,在水土保持生态工程、退耕还林工程、天然林保护工程、“三北”防护林工程、防沙治沙工程、生态建设重点县等一大批国家重点项目建设的支持下,大量适合在沙地生长的植物被种植以用于改良沙地生态环境,在 2016 年左右初见成效,相应的浑善达克沙地植被盖度也是最高的^[39]。

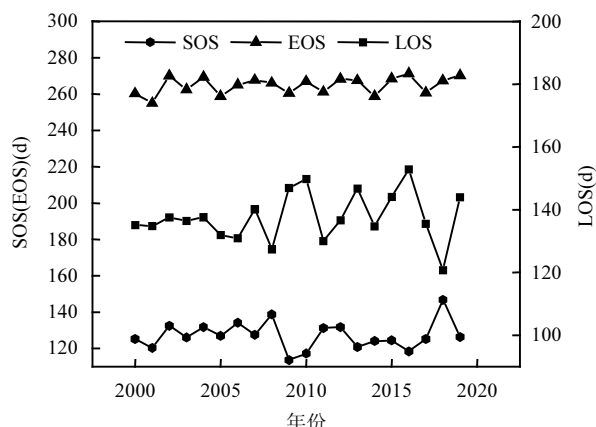


图3 2000~2019年间浑善达克沙地植被物候年变化
Fig.3 Dynamics of annual phenology in the Otindag sandy land during 2000~2019

2.2 浑善达克沙地植被物候空间变化趋势

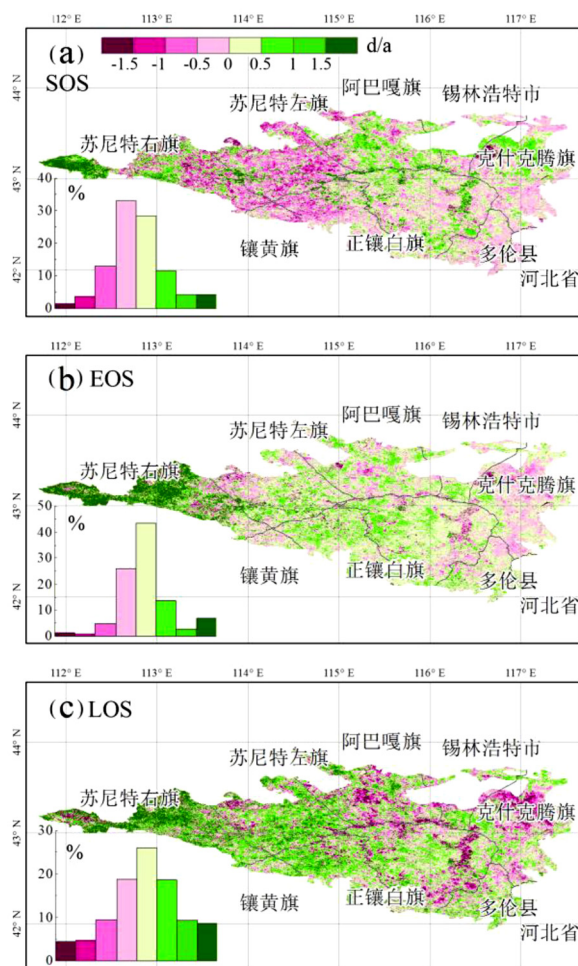


图4 2000~2019年浑善达克沙地植被物候时空变化趋势及面积百分比柱状图

Fig.4 Spatial distribution of trend and area percentage of annual average vegetation phenology in Otindag sandy land during 2000~2019

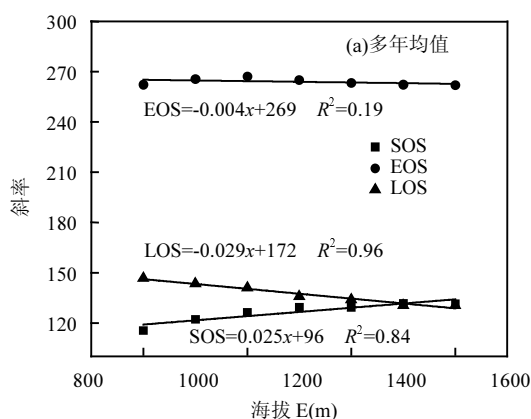
从空间分布来看(图4(a)),植被 SOS 提前趋势面

积与推迟的面积相当,前者占研究区总面积的 51.51%,而后者最明显的地区零星分布于正镶白旗、苏尼特右旗、阿巴嘎旗和克什克腾旗,推迟趋势大于 1d/a(8.70%).植被 EOS 总体呈弱的推迟趋势(图 4(b)),呈推迟趋势的面积比呈提前趋势的面积比重略高,分别占研究区总面积的 67.02%和 32.98%.呈推迟趋势的地区主要分布在研究区的中西部地区,特别是在苏尼特右旗,推迟变化速率为 1.5d/a(9.71%).呈提前趋势的地区主要分布在研究区东部地区,特别是在正镶白旗东部和克什克腾旗大部.从近 20 年的变化趋势看(图 4(c)),植被 LOS 总体也呈弱的延长趋势(0.023d/a),绝大部分区域呈延长趋势,占研究区总面积的 62.71%,而 LOS 缩短趋势最明显的地区零星分布于在正镶白旗、克什克腾旗、锡林浩特市和正蓝旗东部,推迟趋势小于-1d/a(9.11%).

2.3 浑善达克沙地植被物候变化对海拔变化的响应

浑善达克沙地植被物候与海拔关系密切(图 5(a)).海拔每升高 100m, SOS 推迟 2.5d、EOS 提前 0.4d、LOS 缩短 2.9d.在 900~1500m,随着海拔的升高, SOS 显著推迟($R^2=0.84, P<0.01$), EOS 不显著提前($R^2=0.19, P>0.05$), LOS 显著缩短($R^2=0.96, P<0.01$),表明植被枯黄期受海拔梯度变化影响较小.

浑善达克沙地植被物候的年际变化在海拔梯度上的分异如图 5(b)所示,显示了 2000~2019 年每 100m 高度带上物候均值的年际变化与海拔的关系.不同海拔带上 EOS、LOS 均推迟,在 900~1200m 海拔带内,随着海拔升高, EOS 和 LOS 变化趋势一致,推迟幅度逐渐减少,从 1d/a 减少到 0.2d/a,在 1200~1500m 海拔带内,推迟幅度趋于平稳.说明在 1200m 以上, EOS 和 LOS 随着海拔升高,推迟幅度变化不明显. SOS 变化幅度波动较大,提前推迟规律不明显.



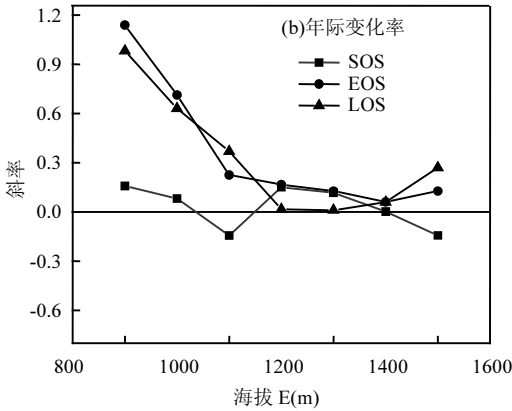


图5 2000~2019年浑善达克沙地植被物候与海拔之间的关系
Fig.5 Relationship between vegetation phenology and altitude in Otindag sandy land during 2000~2019

2.4 浑善达克沙地物候变化对气象因子的响应分析

由于多年平均 SOS 值为 127d,本文逐月分析了 SOS 与当年 1、2、3、4 月至前一年 11、12 月的温度和降水的偏相关性(表 1).研究区植被 SOS 与温度呈明显的正相关性,但相关系数不大.而在温度一定的情况下,降水与植被 SOS 呈明显的负相关性,降水量越充足,SOS 越提前.同样由于 EOS 平均值为 265d,分析了 EOS 与当年 5、6、7、8、9、10 月的温度和降水的偏相关性.植被 EOS 在 6~9 月与温度明显的

正相关性,即在降水一定的情况下,随着温度升高,EOS 被推迟.而在温度一定的情况下,除了 5 月呈负相关,其他月份 EOS 与降水都呈正相关.由于 LOS 由 EOS 和 SOS 计算得来,所以 LOS 与温度和降水偏相关性不作讨论.

表 1 年平均物候与温度、降水量的偏相关分析

Table 1 The partial correlation analysis of annual average phenology, temperature and precipitation

变量(控制变量: 相应月降水量)	偏相关系数		变量(控制变量: 相应月均温度)	偏相关系数	
	SOS	EOS		SOS	EOS
上一年 11 月 温度	0.26	-	上一年 11 月 降水量	-0.45	-
上一年 12 月 温度	0.19	-	上一年 12 月 降水量	-0.4	-
1 月温度	-0.14	-	1 月降水量	-0.35	-
2 月温度	0.1	-	2 月降水量	-0.16	-
3 月温度	0.28	-	3 月降水量	0.45	-
4 月温度	0.36	-	4 月降水量	-0.38	-
5 月温度	-	-0.04	5 月降水量	-	-0.4
6 月温度	-	0.45	6 月降水量	-	0.4
7 月温度	-	0.46	7 月降水量	-	0.39
8 月温度	-	0.25	8 月降水量	-	0.35
9 月温度	-	0.32	9 月降水量	-	0.42
10 月温度	-	-0.27	10 月降水量	-	0.31

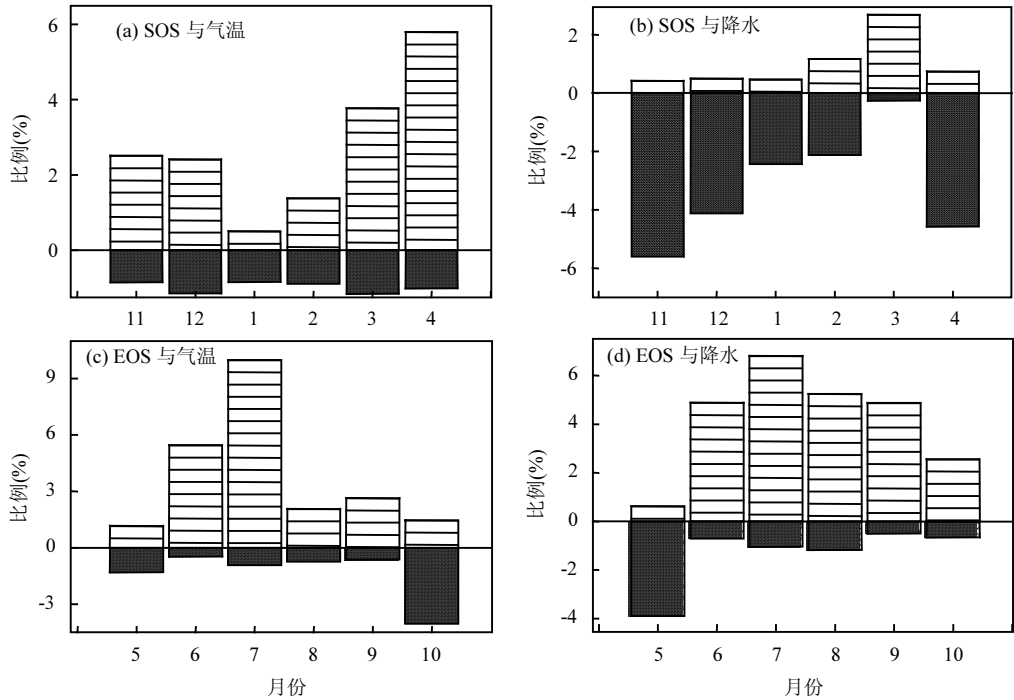


图 6 物候与气候因子的相关系数及其显著性水平

Fig.6 The correlation coefficient between phenology and climate factors with their significance level

▨ $R>0$ ▩ $R<0$

进一步分析显著相关($P<0.05$)地区所占的百分比(图 6).总体上,SOS 与研究时间段的气温呈显著正相关,尤其是前一年 11、12 月和当年 3、4 月呈显著正相关面积占研究区的比分别为:2.51%、2.42%、3.78%、5.80%.除了 3 月份(显著性正相关地区占比为 2.68%),SOS 与降水量在其他月份呈明显的负相关性.EOS 与研究时间段的气温呈显著正相关,尤其是 6、7、8 和 9 月呈显著正相关的面积占研究区的比分别为,5.45%、9.98%、2.07%和 2.64%.除了 5 月份(显著性正相关地区占比为 3.89%),EOS 与降水量在其他月份呈明显的负相关性.

3 讨论

3.1 估算结果的验证

由于本文缺乏实测数据,故采用间接验证的方式对估算结果进行验证.将本文累积 Logistic 曲线曲率极值法和动态阈值法求平均计算的物候值与他人估算的物候均值进行对比验证,来检测估算的准确性与可行性(表 2).比较结果表明,2000~2019 年间浑善达克沙地物候值与前人的研究包括浑善达克

沙地在内的区域物候值基本一致.但遥感监测数据揭示的物候变化趋势有一定偏差,出现这种情况在一些研究中得到了解释,主要原因在于^[10]:1)物候提取方法不同;2)研究区范围和时间序列不一致;3)所使用的遥感数据时空分辨率不同.因此认定,上述方法适合于浑善达克沙地植被物候的时空变化分析.

3.2 浑善达克沙地自然因子对植被物候变化的影响

从浑善达克沙地植被物候时空变化上来看,近 20a 平均 SOS 的空间分布大致与地形和水热空间分布一致,西北部比东部提前,主要由于西部地势相对较低,受温带半干旱草原气候地带影响,随着春季温度升高,低海拔地区的 SOS 出现较早.EOS 的分布与地形无明显的一致性,由于地形敏感性低,而研究区东部较早的原因可能与地势高,同时比西部更接近太平洋,其水汽条件充分有关,同时受季风区范围影响^[41].浑善达克沙地 LOS 主要由 SOS 和 EOS 决定,从空间分布图可以看出,生长季长度与枯黄期分布基本一致,表明近 20a 该地区 EOS 对 LOS 的影响比 SOS 更明显.

表 2 研究结果与其他方法模拟结果比较
Table 2 Comparison of simulated phenology with other simulation results

方法	研究区	年份	SOS	EOS	LOS	文献
Logistic 曲线曲率极值法	蒙古高原	1982~2011	105~140d	266~276d	125~175d	[11]
动态阈值法	内蒙古荒漠草原区	2000~2017	120~130d (-0.88d/a)	290~300d(-0.13d/a)	170~180d(0.76d/a)	[38]
Logistic 曲线曲率极值法	内蒙古草原生态区	2001~2016	128d	269d	141d	[15]
动态阈值法	内蒙古	1982~2013	120~160d(-0.6~0.8d/a)	275~295d (-0.4~0.4d/a)	120~170d (-0.8~0.6d/a)	[2]
NDVI 变化率法	中国温带	1982~1999	110~135d (-0.79d/a)	279~284d (0.37d/a)	140~180d(1.16d/a)	[27]
动态阈值法	中国北方草地	1983~2015	100~130d	245~290d	100~140d	[40]

注:括号内为变化率.

本研究区内 SOS 与前一年冬季和当年春季的气温呈正相关,表明植被返青期会因温度升高而不会提前,有研究表明,在全球气候变暖的情况下,内蒙古植被返青期普遍提前^[42],本文结果与该观点不同,可能原因与浑善达克沙地 SOS 年际变化小而且提前和推迟趋势面积大致相同有关.SOS 与降水量呈显著负相关的面积要多于呈显著正相关面积,尤其前一年冬季和当年春季的降水与返青期呈显著负相关关系,可能由于冬季浑善达克沙地气温较低,降水多以积雪形式

降落到地面,积雪及开春后融化的水分会对植被返青提前产生明显效果^[43].3 月份降水对 SOS 具有较明显的正相关,说明仍有很大一部分区域降水达到饱和会推迟植物开始生长.表明降水是浑善达克沙地植被返青期提前的主要原因之一.

研究区 EOS 与气温和降水都呈密切的正相关性,随着夏天气温升高,枯黄期推迟,由于温度升高将有利于植被光合作用酶的活性,降低叶绿素的霜冻伤害,从而推迟植被的枯黄期^[44].降水的增加有助于

EOS 的推迟,这可能跟沙地水分条件匮乏有关,该夏季和秋季降水量将增加植被盖度从而推迟 EOS,5 月的降水与 EOS 呈负相关,这可能与降雨伴随着温度的降低和云层的增多有关系,进而增加霜冻伤害以及降低光合作用^[45],导致浑善达克沙地植被枯黄期提前.总的来说,浑善达克沙地植被物候变化规律较为复杂,呈现出明显的空间差异性,后续的研究中需进一步考虑引入群落结构、人类活动、自然灾害等因子做深入分析.

4 结论

4.1 在整个研究区范围内,20a 研究区植被物候变化的年际波动均不明显,其中:SOS 在 110~140d(变化率 0.049d/a),空间分布自西向东逐渐增大;EOS 在 250~280d(0.28d/a),空间分布自西南向东北逐渐减小.LOS 在 120~170d(0.23d/a),基本与 SOS 具有相反的分布规律.

4.2 从植被物候变化的空间分布比例上看,呈提前趋势占研究区比重分别为:SOS 为 51.51%、EOS 为 67.02%和 LOS 为 62.71%.

4.3 与海拔关系上看,海拔每升高 100m,SOS 推迟 2.3d,EOS 提前 0.4d、LOS 缩短 2.9d.浑善达克沙地植被 EOS 与整个海拔梯度上敏感性低.在 1200m 以上,枯黄和生长季长度随着海拔升高,推迟幅度变化不明显.

4.4 从偏相关分析来看,前一年 11、12 月和当年 1、2、4 月降水量对 SOS 有提前作用.6、7、8、9 月份气温和降水都对 EOS 推迟有明显的作用.

参考文献:

- [1] Jeongmin Y, Su-Jeong J, Chang-H H, et al. Influence of winter precipitation on spring phenology in boreal forests [J]. *Global Change Biology*, 2018,24(11):5176-5187.
- [2] 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.
- [3] 赵 辉,郑有飞,李 硕,等.基于微气象学方法的麦田 CO₂ 和 O₃ 通量的观测与模拟 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(3):1038-1048.
Zhao H, Zheng Y F, Zhang Y X, et al. Potential risk assessment of ground-level ozone on rice yield under climate change scenarios [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(7):2858-2869.
- [4] Bao G, Chen J Q, Mark C, et al. Dynamics of net primary productivity on the Mongolian Plateau: Joint regulations of phenology and drought [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*, 2019,81:85-97.
- [5] Liu Q, Fu Y H, Zhu Z, et al. Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology [J]. *Global Change Biology*, 2016,22:3702-3711.
- [6] Liu Q, Fu Y H, Zeng Z H, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China [J]. *Global Change Biology*, 2016,22:644-655.
- [7] Chen J, Jonsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91:332-344.
- [8] Yu H Y, Eike L D L, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010,107:22151-22156.
- [9] 姜 康,包 刚,乌兰图雅,等.2001~2017 年蒙古高原不同植被返青期变化及其对气候变化的响应 [J]. *生态学杂志*, 2019,38(8):2490-2499.
Jiang K, Bao G, Wu L T Y, et al. Variations in spring phenology of different vegetation types in the Mongolian Plateau and its responses to climate change during 2001~2017 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019,38(8):2490-2499.
- [10] 萨日盖,包 刚,包玉海,等.内蒙古植被枯黄期变化及其与气候和植被生产力的关系 [J]. *应用生态学报*, 2020,31(6):1898-1908.
Sa R G, Bao G, Bao Y H, et al. Variation in the vegetation fade stage and its relationships with climate and vegetation productivity in Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020,31(6): 1898-1908.
- [11] 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, A L T T Y, 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.
- [12] Dong J, Xiao X, Menarguez, et al. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185:142-154.
- [13] 包 刚,包玉海,覃志豪,等.近 10 年蒙古高原植被覆盖变化及其对气候的季节响应 [J]. *地理科学*, 2013,33(5):613-621.
Bao G, Bao Y H, Qin Z H, et al. Vegetation cover changes in Mongolian Plateau and its response to seasonal climate changes in recent 10years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013,26(3):613-621.
- [14] Zhang G, Dong J, Zhang Y, et al. Reply to Shen et al. No evidence to show nongrowing season NDVI affects spring phenology trend in the Tibetan Plateau over the last decade [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013,110 (26):2330-2331.
- [15] 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):230-238.
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.
- [16] 满卫东,刘明月,王宗明,等.1990~2015 年东北地区草地变化遥感监测研究 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(5):2246–2253.
- Man W D, Liu M Y, Wang Z M, et al. Remote sensing investigation of grassland change in Northeast China during 1990–2015 [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(5):2266–2253.
- [17] 陶 健,张戈丽,王军邦,等.内蒙古中东部地区耕地物候动态研究 [J]. *中国农业科学*, 2011,(22):4583–4592.
- Tao J, Zhang G L, Wang J B, et al. Variation of cropland phenology in mid-eastern Inner Mongolia [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(22):4583–4592.
- [18] 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. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016,25(1): 33–46.
- [19] Wu C, Hou X, Peng D, et al. Land surface phenology of China's temperate ecosystems over 1999–2013: Spatial-temporal patterns, interaction effects, covariation with climate and implications for productivity [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016,216:177–187.
- [20] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal*, 2003,84(3):471–475.
- [21] Shen M G, Piao S L, Cong N, et al. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2015,21(10):3647–3656.
- [22] 孟 琪,武志涛,杜自强,等.基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(2): 826–836.
- Meng Q, Wu Z T, Du Z Q, et al. Quantitative influence of regional fractional vegetation cover based on geodetector model —Take the Beijing-Tianjin sand source region as an example. [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(2):826–836.
- [23] 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.
- [24] 朱震达.中国土地沙漠化的概念、成因和防止 [J]. *第四纪研究*, 1998,(2):145–155.
- Zhu Z D. Concept, cause and control of desertification in China [J]. *Quaternary sciences*, 1998,(2):145–155.
- [25] 王静璞,刘连友,贾 凯,等.毛乌素沙地植被物候时空变化特征及其影响因素 [J]. *中国沙漠*, 2015,35(3):624–631.
- Wang J P, Liu L Y, Jia K, et al. Spatiotemporal variation of vegetation phenology and its affecting factors in the Mu Us Sandy Land [J]. *Journal of Desert Research*, 2015,35(3):624–631.
- [26] Jin H, Bao G, Chen J, et al. Modifying the maximal light-use efficiency for enhancing predictions of vegetation net primary productivity on the Mongolian Plateau [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020,41(10):3740–3760.
- [27] 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*, 2011,151:1599–1608.
- [28] 银 山.内蒙古浑善达克沙地荒漠化动态研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.
- Yin S. Study on the dynamic desertification of Inner Mongolia Hunshandake Sand Land [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [29] Yang X, Wang X, Liu Z, 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*, 2014,78:369–380.
- [30] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001~2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2012,67(9):1255–1268.
- Mu S J, Li J L, Chen Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001–2010. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(9):1255–1268.
- [31] Bao G, Tuya A, Bayarsaikhan S, et al. Variations and climate constraints of terrestrial net primary productivity over Mongolia [J]. *Quaternary International*, 2020,537:112–125.
- [32] 包 刚,覃志豪,包玉海,等.1982~2006 年蒙古高原植被覆盖时空变化分析 [J]. *中国沙漠*, 2013,33(3):918–927.
- Bao G, Qin Z H, Bao Y H, et al. Spatial-temporal changes of vegetation cover in Mongolian Plateau during 1982–2006. *Journal of Desert Research*, 2003,33(3):918–927.
- [33] Roerink G J, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000,21:1911–1917.
- [34] Hou X H, Gao S, Niu Z, et al. Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014,35: 3316–3330.
- [35] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002,40(8):1824–1832.
- [36] 元志辉,雷 军,包 刚,等.土地利用/覆盖变化对浑善达克沙地植被覆盖度的影响 [J]. *水土保持学报*, 2016,(6):330–338.
- Yuan Z H, Lei J, Bao G, et al. The impacts of land use/cover change on vegetation coverage in the Otindag Sandland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,(6):330–338.
- [37] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(12): 3752–3764.
- [38] 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. *Progress in Geography*, 2020,39(1):24–

- 35.
- [39] 王 强,张 勃,戴声佩,等.三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(7):1302-1308.
- Wang Q, Zhang B D, Sheng P, et al. Analysis of the vegetation cover change and its relationship with factors in the Three-North Shelter Forest Program [J]. China Environmental Science, 2012,32(7):1302-1308.
- [40] 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.
- [41] Wang H J, Chen Y N, Chen Z S. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960-2010 [J]. Hydrological Processes, 2013,27: 1807-1818.
- [42] 徐 煜.2001~2015 年甘肃省植被覆盖、物候变化及对气候变化的响应 [D]. 兰州:甘肃农业大学, 2018.
- Xu Y. Dynamic change of vegetation and phenology response to climate change in Gansu Province during 2001~2015 [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [43] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, et al. Colder soils in a warmer world: A snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem [J]. Bio geochemistry, 2001,56:135-150.
- [44] Yang Y T, Guan H D, Shen M G, et al. Changes in autumn vegetation dormancy onset date and the climate controls across temperate ecosystems in China from 1982 to 2010 [J]. Global Change Biology, 2015,21:652-665.
- [45] Mao D H, Wang Z M, Luo L, et al. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China [J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geo information, 2012,18:528-236.

作者简介: 元志辉(1988-),男,内蒙古乌兰察布人,内蒙古师范大学博士生,主要从事土地覆被与生态修复研究.发表论文 4 篇.

《中国环境科学》2011~2014 年发表的论文中 20 篇入选“领跑者 5000”提名论文

《中国环境科学》2011~2014 年发表的论文中有 20 篇入选“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”提名论文。“领跑者 5000(F5000)”平台由中国科学技术信息研究所于 2013 年建设,旨在集中展示中国精品科技期刊上发表的最高端的学术研究成果,将与国际和国内重要检索系统链接,扩大论文影响.该平台将与汤森路透公司合作,拟利用 WOK 国际检索系统平台,与 SCI 数据库在同一平台内实现文献链接和国际引文检索,在更大范围内向世界科技同行展示和推广中国最重要的科研成果.提名论文均为 2011~2014 年在学科领域内被引率排名居前的论文.本次环境学科共有 65 篇文章入选“领跑者 5000”提名论文.