

北方农牧交错带植被 NPP 的时空变化及其驱动因子分析

薛晓玉¹, 王晓云¹, 段含明^{1,2}, 颀耀文¹

(1.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2.西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637002)

摘要:为了掌握北方农牧交错带植被 NPP 的多年时空变化特征,研究气候变化和人类活动对植被 NPP 的影响,基于 VEGETATION-NDVI 数据、气象数据及植被类型数据,采用 CASA 模型,对北方农牧交错带的植被 NPP 进行了估算,采用 Theil-Sen Median 趋势分析、偏相关分析、残差分析等方法分析了该地区 NPP 与气候因子及人类活动的关系。结果表明:1998—2016 年研究区的 NPP 年均值空间上呈西南、东北高,中间低,研究区内 NPP 增加的区域明显大于 NPP 减少的区域;年降水量呈东南高、西北低分布,而年平均气温分布呈南高北低、东高西低,在研究时段内,年降水量整体呈增加趋势,大部分地区的年平均气温也呈上升趋势;NPP 与降水量之间存在正相关关系,与年平均气温具有明显的负相关关系;气候变化和人类活动对植被影响的积极贡献明显大于对植被变化的消极作用,气候变化在植被恢复中占主导地位,人类活动是植被退化的主要因素。在北方农牧交错带植被 NPP 的主要影响因子是气候变化,降水的增多促进了植被的修复;气温升高和人类活动增强导致了植被的退化,因此,减少人类活动和减缓气候变暖对于该地区植被的修复具有重要意义。

关键词:北方农牧交错带; NPP; 时空变化; 气候变化; 人类活动

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0190-08

Temporal and Spatial Changes of NPP and Its Causes in the Agricultural Pastoral Ecotone of Northern China

XUE Xiaoyu¹, WANG Xiaoyun¹, DUAN Hanming^{1,2}, XIE Yaowen¹

(1.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000,

China; 2.School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637002, China)

Abstract: In order to grasp the characteristics of multi-year spatiotemporal changes of vegetation NPP in the agricultural pastoral ecotone of northern China (APENC), the effects of climate change and human activities on vegetation NPP were studied. Based on VEGETATION-NDVI data, meteorological data and vegetation type data, the CASA model was used to estimate the vegetation NPP in the agricultural pastoral ecotone of Northern China. The Theil-Sen Median trend analysis, partial correlation analysis, residual analysis and other methods were used to analyze the relationship between NPP and climate factors and human activities in this area. The following conclusions are drawn. The annual average value of NPP in the study area from 1998 to 2016 was spatially high in the southwest and northeast, and low in the middle. The increase in NPP in the study area was significantly larger than the decrease in NPP. The annual precipitation was high in the southeast and low in the northwest, while the annual average temperature was high in the south and low in the north, high in the east and low in the west. During the study period, the annual precipitation had an overall increasing trend, and the annual average temperature in most areas had also increasing trend. There was a positive correlation between NPP and precipitation, and an obvious negative correlation with annual average temperature. The positive contribution of climate change and human activities to vegetation was significantly greater than its negative effect. Climate change is dominant in vegetation restoration. Human activities are

收稿日期:2020-05-20

修回日期:2020-06-03

资助项目:国家自然科学基金重点项目“西北农牧交错带土地利用/覆被变化对地表水热过程的影响”(41530752)

第一作者:薛晓玉(1994—),女,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为遥感与地理信息系统应用。E-mail:535382729@qq.com

通信作者:颀耀文(1969—),男,甘肃甘谷人,教授,主要从事地图学与环境遥感研究。E-mail:xiyew@lzu.edu.cn

the main factor of vegetation degradation. The main influencing factor of vegetation NPP in the APENC is climate change. The increase in precipitation promotes the restoration of vegetation; the increase in temperature and the enhancement of human activities lead to the degradation of vegetation. Therefore, reducing human activities and slowing down climate warming are of great significance to the restoration of vegetation in this area.

Keywords: agricultural pastoral ecotone of northern China; NPP; spatial change; climate change; human activities

近年来,全球范围的气候异常变化、人类活动不断增强,这些问题正影响着陆地生态系统的平衡,导致区域生态环境的破坏,直接或间接地影响到植被 NPP 变化,使其变化驱动的研究显得尤为重要^[1-2]。NPP 不仅可以直接表征陆地生态系统的质量状况,而且在保持生态系统平衡和调节区域生态环境中扮演着重要的角色^[3]。净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指植物在单位时间和面积上由光合作用产生的有机物总量减去自身呼吸作用消耗有机物的剩余量,这部分能量是其自身用于生长和繁殖的能量,也是生态系统中其他成员生存和繁衍的物质基础^[4]。

植被 NPP 的估算方法很多,根据模型对输入参数的选择,可将现有模型大体分为 3 类:气候相关模型、机理模型和光能利用率模型^[5-7]。气候相关模型是根据野外获取的采样点实测数据来建立 NPP 与气候因子的简单统计回归模型,但该模型由于缺乏生态学理论作为依据或只能对潜在 NPP 进行模拟,估算的准确性不高^[5]。机理模型是以气候、土壤和植被等因子作为输入参数,模拟生态系统中的光合作用、呼吸作用和土壤微生物的分解过程,从而模拟植被的能量流动与物质转换,涉及到的输入参数较多,且其中部分参数不易获取,单纯的机理模型发展具有局限性^[7]。光能利用率模型是以光合作用原理为依据,以 NDVI 数据、太阳辐射数据、气温和降水数据及植被类型数据为输入因子,与其他模型相比,对地面实测数据的依赖较小,且模型的输入参数相对较少,易于收集,在区域尺度和大尺度测算 NPP 的研究以及全球碳循环研究中被广泛采用^[8-13]。

NPP 的产量不仅仅受到植被本身的影响,而且还会受到外部条件的限制^[14]。目前,对于影响 NPP 的自然因素研究主要集中在气温、降水和地形等方面的研究^[15-17]。随着社会生产力的不断发展,人类活动对生态环境产生的影响逐渐表现出全球性,其对植被生长的影响也日益显著,因此,定量分析气候变化和人类活动如何影响植被变化成为当前的研究热点^[18-20]。北方农牧交错带作为中国北方典型的农、牧业系统过渡带,地理位置突出,对外界的抵抗力较弱,且对气候变化和人类活动的干扰敏感。20 世纪 70 年代末期以来,国家先后

实施了“三北防护林”、“退耕还林”和“京津沙尘暴源治理”等生态工程,出台了草地生态保护补偿奖励政策,努力促使北方农牧交错带的植被恢复和好转^[21]。深入研究这一区域 NPP 时空变化及其驱动因子,不仅可以揭示气候变化、人类活动与植被变化的相互作用机制,还可为改善区域的生态环境提供参考。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

本研究参考赵松乔^[22]、赵哈林等^[23]的研究成果,将北方农牧交错带界定为多年平均年降水量 300~450 mm、降水年变率 15%~30%和干燥度指数 0.2~0.5 范围内的区域^[21]。为了保持空间的连贯性,并考虑不同时期的北方农牧交错带边界变化的特点,构建了宽 50 km 的缓冲区,由此形成了本研究所采用的研究区^[21],其介于 34°48′—47°19′N,101°43′—126°00′E,面积为 83.5 万 km²,海拔高度为 100~4 700 m。该区位于东部季风区与西北大陆性气候区的过渡带,年平均气温为 0~9℃,其西北地区干旱少雨,植被稀少;东南地区降水丰沛,气候湿润。由于特殊的地理位置,北方农牧交错带在地貌和气候的双重作用下,生态环境的承载力较小。

1.2 数据来源及预处理

NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。该产品经过了辐射校正、大气校正、几何校正和多波段合成技术等预处理,采用最大值合成法生成 1998 年以来的中国月度(1—12 月)、季度(春、夏、秋、冬)、年度的植被指数数据集,数据的空间分辨率都为 1 km。气象数据为 1998—2016 年北方农牧交错带及其周围 166 个站点的日平均气温、日降水量和 30 个站点的逐月辐射数据,来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。对该数据进行累加统计得到相应站点的月平均气温和月降水量数据,与辐射月值数据均采用 ANUSPLIN 方法^[24]进行空间插值获得与 NDVI 数据有相同投影和空间分辨率的栅格数据。植被类型数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。该数据是基于 IGBP 分类系统的植被类型数据,生产年份为 2000

年,空间分辨率为 1 km,中国地区的总体分类精度为 71%,高于其他数据分类产品,可以作为光能利用率模型的输入数据。本文对以上数据进行了裁剪、投影变换、镶嵌等预处理,作为 CASA 模型的主要输入数据,最终的分析区域是将研究区内非植被区域进行掩膜处理的植被覆盖区。

2 研究方法

2.1 基于 CASA 模型的 NPP 估算及验证

CASA 模型^[25]是以 NDVI 数据、气象数据(气温、降水、太阳辐射)以及植被类型数据为输入信息来驱动模型。在模型中,NPP 的值由植物吸收的光合有效辐射(APAR)和光利用率(ϵ)2 个因子来表示,其估算公式如下:

$$NPP(x,t)=APAR(x,t)\times\epsilon(x,t)\tag{1}$$

式中: t 为时间; x 为空间位置; $APAR(x,t)$ 为像元 x 在 t 月份吸收的光合有效辐射 $[MJ/(m^2\cdot月)]$; $\epsilon(x,t)$ 为像元 x 在 t 月份的实际光利用率(g C/MJ)。具体解算过程参见文献[25]。

在 NPP 估算过程中,会由于一些不可控因素引入误差,因此需要对估计结果进行精度评价。本文采取与其他学者的成果进行对比的方法,从而验证 CASA 模型在本研究区的适用性。发现模拟结果与其他学者的总体相似(表 1),与李萌萌^[26]基于改进的 CASA 模型估算的陕西省植被 NPP 结果相比较,各类植被的 NPP 值基本一致,其中差别较大的是落叶阔叶林,可能的原因是研究区内阔叶林种类不同所致;其与 CEVSA 模型^[27]和 GLO-PEM^[28]模型估算的结果存在一定的差异,但其模拟结果均表现为林地 NPP 偏高,草地、农田偏低,误差的存在是必然的,但是其值的大小均在可以接受的合理变动范围之内,说明本研究利用 CASA 模型估算的 NPP 是具有较高准确性的,并且具有一定价值,可作为区域 NPP 研究的基本数据。

表 1 本文植被 NPP 模拟结果与其他模型研究对比

植被类型	本文	CASA 模型	CEVSA 模型	GLO-PEM 模型
常绿针叶林	342.73	382.00	486	355.00
落叶阔叶林	598.32	679.00	624	451.00
混交林	478.50	458.00	423	669.00
灌木林	424.67	382.00	—	616.00
草地	345.74	405.00	348	145.00
农田	370.05	390.00	606	474.00

注:“—”代表未发现。

2.2 Theil-Sen Median 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析^[29]是计算样本数据的中值,计算公式为:

$$S_{NPP}=\text{median}\left[\frac{NPP_j-NPP_i}{j-i}\right],i<j\tag{2}$$

式中: S_{NPP} 为 Theil-Sen Median 趋势; NPP_i , NPP_j 分别为第 i 年和第 j 年像元的 NPP 值。该计算方法计算的是 $n(n-1)/2$ 个数据组合斜率的中位数。当 $S_{NPP}>0$ 时;NPP 呈上升趋势,反之则呈下降趋势。

2.3 偏相关方法

本研究的 NPP 是基于气象因子作为输入数据利用 CASA 模型模拟得到的,其与降水、气温具有一定的关系,因此通过相关分析方法^[30]来分析 NPP 与降水量或气温的相关性,相关性系数公式如下:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^n[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2}}\tag{3}$$

式中: R_{xy} 为 x , y 两个变量的相关系数; n 为样本数; x_i 为第 i 年/月的植被 NPP; \bar{x} 为 x_i 的平均值; y_i 为第 i 年/月的降水量或气温; \bar{y} 为 y_i 的平均值。

在分析多个因素对 NPP 的影响时,暂不考虑其他因素的影响而单独研究某一个因素与 NPP 的相关程度即为 NPP 的偏相关分析,偏相关系数计算公式如下:

$$r_{xyz}=\frac{r_{xy}-r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}}\tag{4}$$

式中: r_{xyz} 为变量 z 固定后变量 x 与变量 y 的偏相关系数; r_{xy} , r_{xz} , r_{yz} 分别为变量 x 与变量 y 、变量 x 与变量 z 、变量 y 与变量 z 的相关系数。

本文采用 T 检验方法对以上的偏相关系数进行显著性检验,计算公式如下:

$$T=\frac{r_{xyz}}{\sqrt{1-r_{xyz}^2}}\sqrt{n-2}\tag{5}$$

2.4 基于 Thornthwaite 模型估算植被潜在生产力

本研究选用 Thornthwaite 纪念模型^[1]来估算潜在 NPP,模型计算公式如下:

$$NPP=3000\times[1-e^{-0.0009695(E-20)}]\tag{6}$$

式中:NPP 为潜在净初级生产力 $[g\ C/(m^2\cdot a)]$; E 为年实际蒸散量(mm)。

另外, E 的具体计算式如下:

$$E=\frac{1.05r}{\sqrt{1+(1+1.05r/L)^2}}\tag{7}$$

$$L=2000+25T+0.05T^3\tag{8}$$

式中: r 为年总降水量(mm); L 为年最大蒸散量(mm); T 为年平均气温($^{\circ}C$)。

2.5 气候变化和人类活动对植被 NPP 变化相对影响的评估方法

本文参考郭继凯^[31]、周妍妍^[20]等有关 NPP 变化

的情景设定方案,通过每年不同类型 NPP 的变化量来评估气候变化和人类活动对植被生产力的相对贡献。其中,第 1 种是实际 NPP 的变化量(N_A);第 2 种是潜在 NPP 的变化量(N_P);第 3 种为人类活动对 NPP 的影响(N_H),通过计算潜在 NPP 变化量跟实际 NPP 变化量的差值来获得($N_H=N_P-N_A$)。

通过计算 N_A , N_P , N_H 的斜率 K_A , K_P , K_H 来区分气候变化和人类活动对 NPP 的改善和退化作用。 $K_A>0$ 代表实际 NPP 趋于增加状态, $K_A<0$ 表示实际 NPP 逐渐减少。 $K_P>0$ 代表气候变化有利于植被恢复, $K_P<0$ 表明气候变化导致植被退化。 $K_H>0$ 代表人类活动导致植被退化; $K_H<0$ 表示人类活动促进植被生长。

计算 N_A , N_P 和 N_H 的变化趋势,采用的方法是 Theil-Sen Median 方法。具体情景设定方案见表 2。

表 2 各种可能情景下气候变化与人类活动在植被净初级生产力变化中相对作用的评价方法				
植被变化情况	情景	K_P	K_H	气候变化和人类活动的相对作用
植被恢复($K_A>0$)	1	>0	>0	气候变化主导植被恢复
	2	<0	<0	人类活动主导植被恢复
	3	>0	<0	共同作用主导植被恢复
植被退化($K_A<0$)	4	<0	<0	气候变化主导植被退化
	5	>0	>0	人类活动主导植被退化
	6	>0	<0	共同作用主导植被退化

3 结果与分析

3.1 北方农牧交错带植被 NPP 空间分布及变化趋势

3.1.1 NPP 的空间分布 本文以 CASA 模型为基础,制作了 1998—2016 年北方农牧交错带的植被 NPP 数据,空间分辨率为 1 km。植被 NPP 多年平均值空间分布见图 1,空间上呈西南、东北高,中间低的分布特征,其值为 13.87~1 251.06 g C/(m²·a),主要集中在分布在 200~500 g C/(m²·a),总体平均值为 364.93 g C/(m²·a)。植被多年平均 NPP 的高值区主要位于西南部的祁连山山麓地带、中部的燕山山脉、吕梁山、恒山等地、东部的大兴安岭地区,而低值区主要分布在中西部植被稀少的干旱地区,植被 NPP 多年平均值为 13.87~200, 200~500, 500~1 251.06 g C/(m²·a)时,分别占总面积的 11.58%, 74.43%, 13.99%。

3.1.2 NPP 的时空变化特征 1998—2016 年北方农牧交错带植被 NPP 年均值变化见图 2,近 19 a 间,植被 NPP 年均值变化范围在 302.70~459.76 g C/(m²·a),呈显著的上升趋势,2013 年的植被 NPP 年均值为最高,达到了 459.76 g C/(m²·a),

2001 年的植被 NPP 年均值最低,每年的植被 NPP 的平均增加量约为 3.95 g C/(m²·a)。

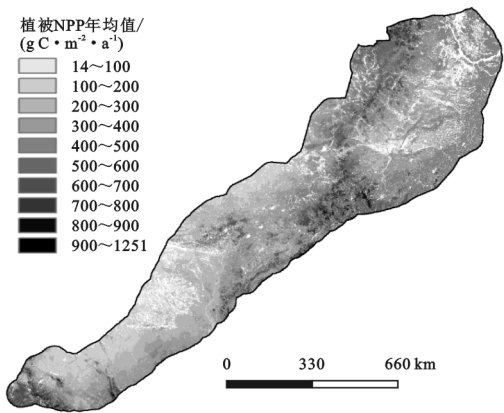


图 1 1998—2016 年北方农牧交错带植被 NPP 多年平均值空间分布

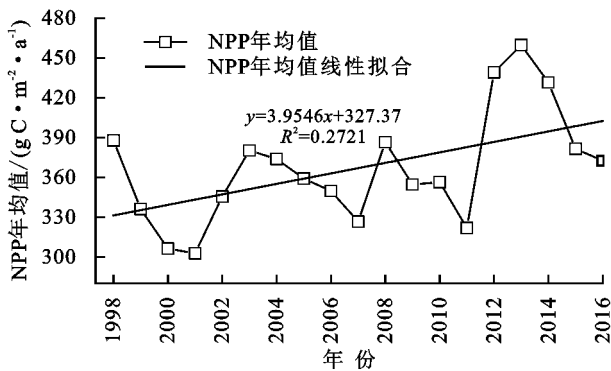


图 2 1998—2016 年北方农牧交错带 NPP 年均值变化

采用 Theil-Median 趋势分析方法模拟了每个像元的净初级生产力变化趋势,反映了 19 a 间研究区植被 NPP 变化的空间特征(图 3)。研究区内植被 NPP 增加的区域明显大于植被 NPP 减少的区域,说明植被生长状况较好。显著增加的区域主要分布在研究区中、西部的偏南地区及东北平原的部分零散区域;显著减少的区域较少,主要分散分布在内蒙古自治区东北部。其中,植被 NPP 增加速率大于 3 g C/(m²·a)的区域面积占总面积的 56.95%;植被 NPP 减小速率大于 3 g C/(m²·a)的区域面积占总面积的 5.42%;植被 NPP 增加速率和减小速率小于 3 g C/(m²·a)的区域面积分别占总面积的 13.18%, 24.55%。

3.2 气候因子的空间分布及变化趋势

3.2.1 气候因子的时空变化特征 根据降水和气温的线性拟合结果可以看出(图 4),表明 1998—2016 年北方农牧交错带的降水量呈上升趋势,速率为 3.945 mm/a(图 4A)。年平均气温呈上升趋势,速率较小,线性回归增加速率是 0.007 3℃/a(图 4B)。近 19 a 间,2000 年的总降水量最低,为 316.29 mm,2012 年降水量最高,年平均气温最低,分别为 509.31 mm 和 4.74℃,2015 年的年平均气温最高,为 6.94℃。

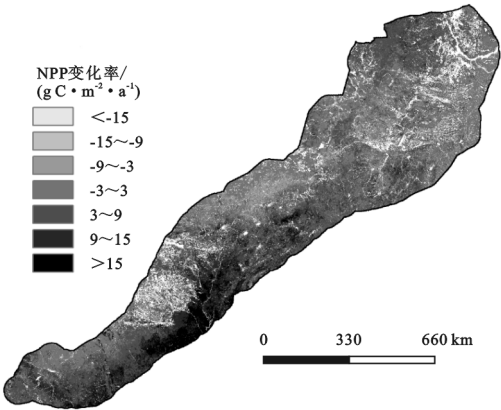


图 3 1998—2016 年北方农牧交错带 NPP 的 Theil-Sen Median 趋势分析结果

根据北方农牧交错带及其周边 166 个气象站降水资料的插值数据进行趋势分析,1998—2016 年的年降水量空间分布如图 5A 所示,可以看出研究区内

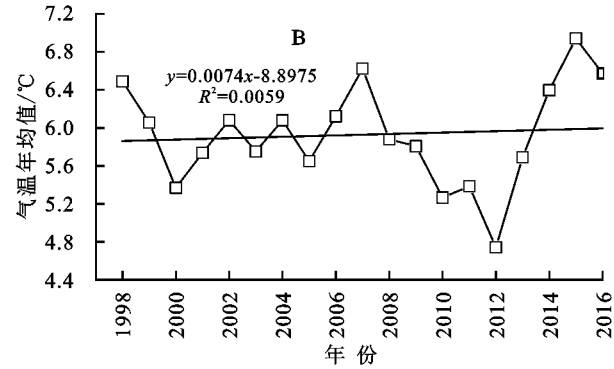
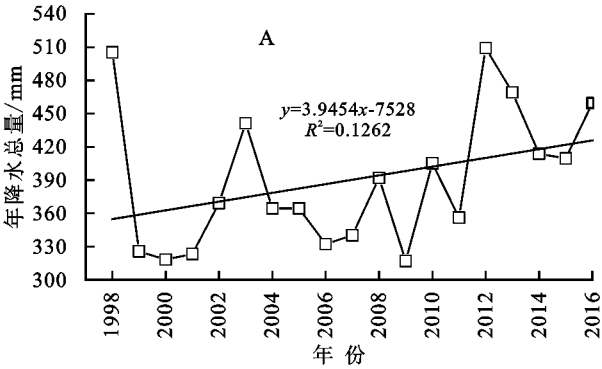


图 4 1998—2016 年北方农牧交错带降水气温变化

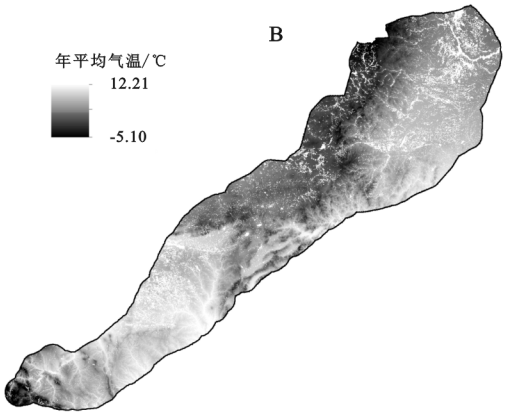
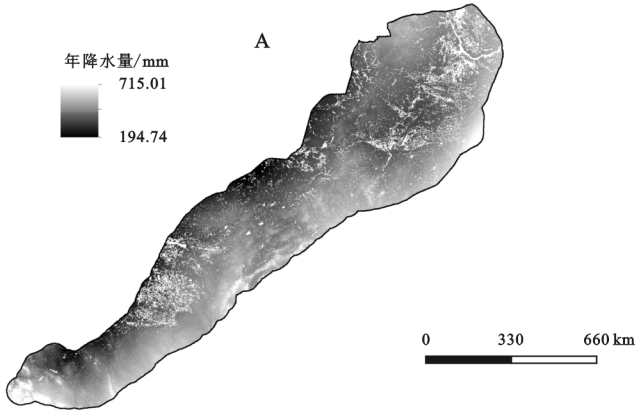


图 5 1998—2016 年北方农牧交错带年降水量和年平均气温空间分布

3.2.2 气候因子的空间变化特征 近 19 a 间,研究区大部分区域年降水量呈增加趋势(图 6A),呈增加、减少趋势的面积分别占总面积的 96.72%,3.28%,增加较为明显的区域分布于阴山山脉以南的陕西省东北部和山西省西北部,西辽河平原吉林省铁岭市北部、松嫩平原等地。年降水量呈下降趋势的区域主要位于阴山山脉以东的内蒙古自治区中东部和六盘山以西的甘肃省东南部等地。在全球变暖的大趋势下,1998—2016 年研究区内 70.60% 的区域年平均气温

的降水量具有明显的空间差异,总体上东南高,西北低。研究区的最高年均降水量为 715.01 mm,最低年均降水量为 194.74 mm。受海陆位置和地形等地理环境的影响,研究区内年均降水量具有明显的区域性差异,自东南向西北逐渐减小,大兴安岭、阴山山脉、黄土高原北缘一线的西北地区年均降水量多在 200~400 mm,东南季风区距离海洋较近,雨水充足,降水量在 400~600 mm。由研究区的年平均气温空间分布图(图 5B)可以看出,该地区的气温也有明显的空间差异,呈现南高北低,东高西低的趋势。全年年平均气温小于 5℃ 的区域主要位于阴山山脉以北和大兴安岭以西以及研究区西南部青海省和甘肃省的祁连山地区,其中部分地区小于 0℃。年平均气温在 10℃ 以上主要分布在无定河上游的小部分区域,其余地区年平均气温为 5~10℃。

呈上升趋势(图 6B)。增温明显的区域主要分布在大兴安岭的东北部、燕山北部、吕梁山北部、黄土高原西南部、祁连山东北部山麓地带。年平均气温呈下降趋势的区域占研究区总面积的 29.40%,主要位于松嫩平原、浑善达克沙地东南部、鄂尔多斯高原等地。

3.3 NPP 变化与影响因子的关系

3.3.1 NPP 变化与气候变化的关系 从植被 NPP 与降水的相关分布及相关显著性分布(图 7A、图 8A)可以看出,研究区植被 NPP 与降水量之间主要呈正

相关,植被 NPP 与年降水量的总体平均偏相关系数为 0.369 2,研究区内 97.70% 的像元 NPP 值和降水量正相关。NPP 和降水量的正相关的区域主要分布在黄土高原、鄂尔多斯高原、河套平原、大青山、浑善达克沙地、大兴安岭、松嫩平原、西辽河平原等大部分地区,降水的增加可促进植被生长状况的改善,但这些区域的正相关关系并不显著;而 NPP 和降水呈负相关关系极显著的区域主要位于研究区西南部祁连山东北部山麓、吕梁山和太行山北部、燕山山脉周边等地,这些区域海拔较高或者纬度较高,气温较低,说

明降水的增多并不能改善该地的植被生长。图 7B 和图 8B 为研究区植被 NPP 与相应时期平均气温的相关关系及相关显著性分布,NPP 与平均气温的整体平均偏相关系数为 0.004 8,呈负相关的像元占比为 50.49%,且负相关关系是极显著的;NPP 与平均气温呈正相关关系不显著的区域较多,集中分布在青海省东北部、甘肃省东南部及松嫩平原南部等地区,研究区内中部和东北部的大部分区域海拔较高、纬度较高,冬季长,热量累积较少,从而表明热量不足会抑制植被生长。

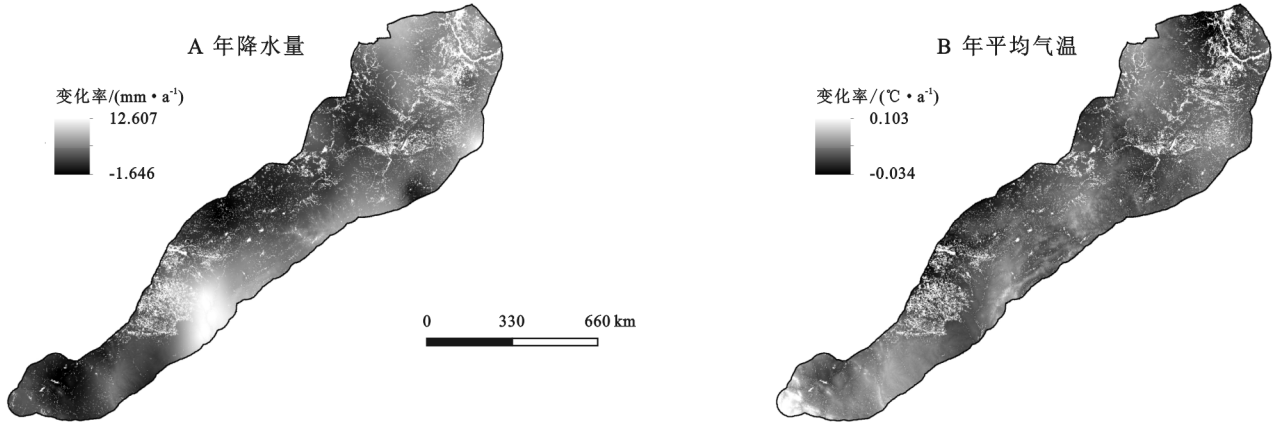


图 6 1998—2016 年北方农牧交错带年降水量和年平均气温变化趋势空间分布

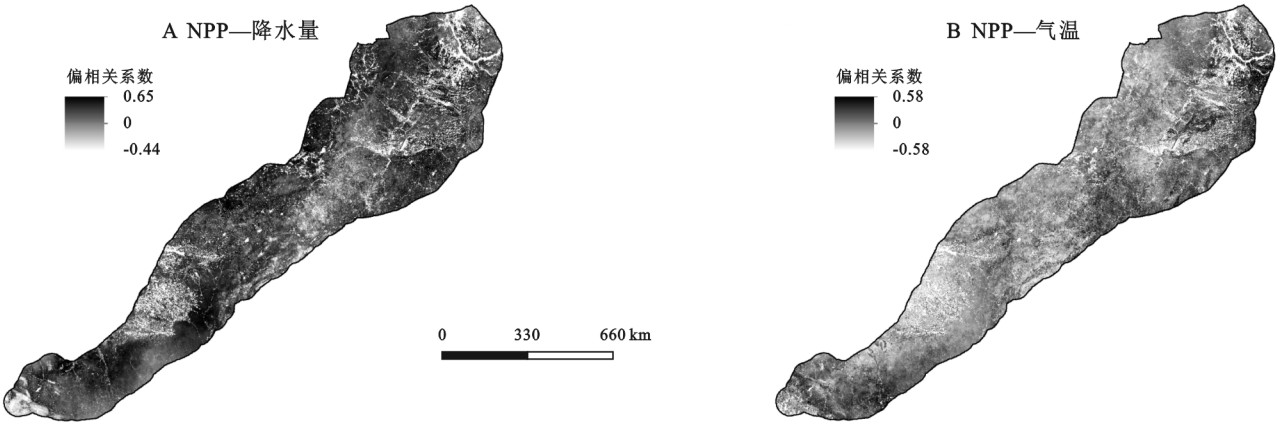


图 7 1998—2016 年北方农牧交错带植被 NPP 与气象因子的空间相关性分布

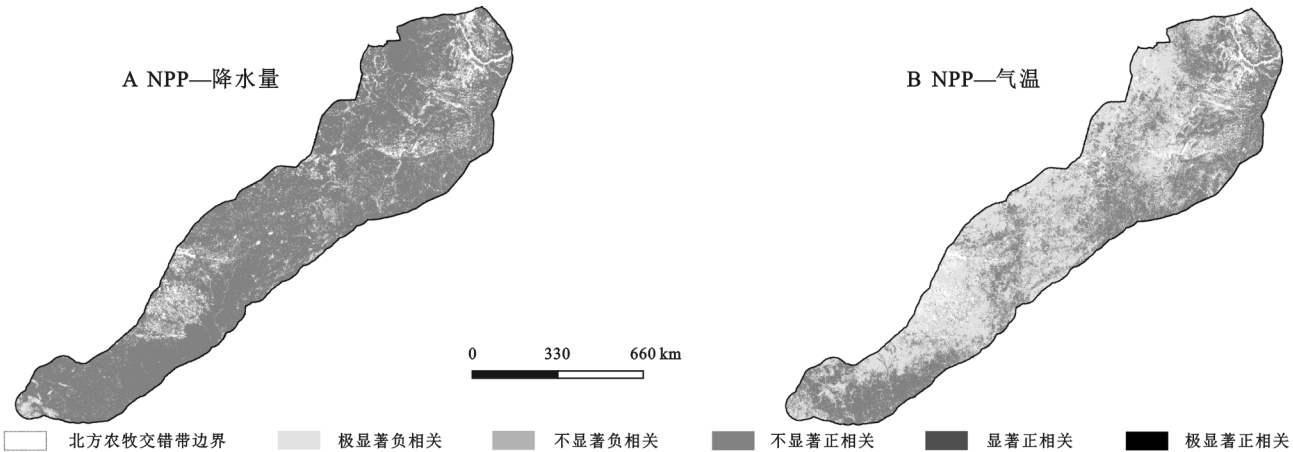


图 8 1998—2016 年北方农牧交错带植被 NPP 与气象因子的相关显著性分布

3.3.2 气候变化和人类活动对 NPP 的相对影响

从气候变化和人类活动影响植被 NPP 变化的空间分布可以看出,气候变化和人类活动对植被影响的积极作用明显大于其对植被的消极贡献(表 3,图 9)。气候变化主导植被恢复的面积占总面积的 47.64%,主要分布在研究区东部的西辽河平原和松嫩平原,主要土地利用类型为农田,气候变化主导植被恢复的情况在研究区中西部的农牧交错带呈零星分布。人类活动使植被 NPP 增加的面积占总面积的 2.16%,集中分布在甘肃省兰州市周边、内蒙古自治区乌兰察布市和呼和浩特市边缘交界处。二者共同作用促进植被改善的面积占总面积的 30.56%,主要分布研究区中西部的农牧交错地区。

表 3 各影响因素主导植被 NPP 变化的比例分布

植被变化	主导植被变化的 影响因素	比例/%
植被恢复	气候变化	47.64
	人类活动	2.16
	共同作用	30.56
植被退化	气候变化	0.56
	人类活动	17.67
	共同作用	1.41

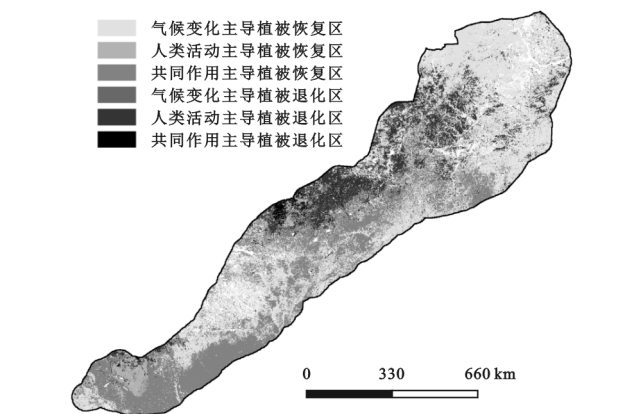


图 9 气候变化和人类活动主导植被 NPP 变化的空间分布

气候变化导致植被 NPP 退化的面积占总面积的 0.56%,主要分散分布在甘肃省白银市、内蒙古自治区乌兰察布市等地。人类活动主导植被 NPP 减少的面积占总面积的 17.67%,集中分布在内蒙古自治区中、东部等地,主要土地利用类型为草地和林地。二者共同作用导致植被退化的面积占总面积的 1.41%,主要离散分布在甘肃省白银市西部、内蒙古自治区呼和浩特市东部、乌兰察布市西部等地。由上述分析可知,在研究区内的甘肃省兰州市和白银市交界处、内蒙古自治区呼和浩特市和乌兰察布市交界处,引起植被变化的影响因素交叉分布。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 在分析 NPP 与影响因素的关系时,仅考虑了降水、气温和人类活动的影响;由于研究区范围较大,在分析自然因素影响时,没有考虑到地形地貌、土壤质地等方面,对人类活动主控因素的确定没有具体化。需要进一步对研究区的 NPP 变化成因进行分段分析,并结合多方面的影响因子来说明变化成因。

(2) 限于研究区的范围较广、研究尺度较大等原因,没有进行实地植被 NPP 的野外调查,缺少实地验证,在以后的工作中,应加强设计合理的野外观测试验,从而进一步提高模型的模拟精度。

4.2 结论

(1) 1998—2016 年,研究区的 NPP 年均值空间上呈现西南、东北高,中间低的特点,研究区植被的 NPP 年均值主要集中分布在 200~500 g C/(m²·a)。植被 NPP 增加的区域明显大于植被 NPP 减少的区域,显著增加的区域主要分布在研究区中、西部的偏南地区及东北平原的零星地区;显著减少的区域分散分布于研究区的东北边缘。

(2) 研究区内气象要素(降水和气温)的分布具有明显的时空差异,年降水量呈东南高、西北低分布,而年平均气温分布呈现南高北低、东高西低,在研究时段内,年降水量整体呈增加趋势,大部分地区的年平均气温也呈上升趋势。

(3) 北方农牧交错带的植被 NPP 与降水量之间存在正相关关系,而与年平均气温具有明显的负相关关系。研究时段内,气候变化和人类活动对植被影响的积极贡献明显大于对植被变化的消极作用,气候变化、人类活动以及气候变化和人类活动共同作用造成植被恢复的面积分别占恢复总面积的 59.28%,2.68%,38.04%;其三者造成植被退化的面积,分别占退化总面积的 2.87%,89.96%,7.17%。

参考文献:

- [1] 杜金桑,于德永.气候变化和人类活动对中国北方农牧交错区草地净初级生产力的影响[J].北京师范大学学报:自然科学版,2018,54(3):365-372.
- [2] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498.
- [3] 焦伟,陈亚宁,李稚.西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J].生态学杂志,2017,36(1):181-189.
- [4] 杜梦洁,郑江华,任璇,等.地形对新疆昌吉州草地净初

- 级生产力分布格局的影响[J].生态学报,2018,38(13):4789-4799.
- [5] 孙睿,朱启疆.陆地植被净第一性生产力的研究[J].应用生态学报,1999,22(6):757-760.
- [6] 王宗明,梁银丽.植被净第一性生产力模型研究进展[J].西北林学院学报,2002,17(2):22-25.
- [7] 朱文泉,陈云浩,徐丹,等.陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J].生态学杂志,2005,24(3):296-300.
- [8] 孙睿,朱启疆.中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J].地理学报,2000,55(1):36-45.
- [9] 孙睿,朱启疆.气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究[J].遥感学报,2001,5(1):58-61,83.
- [10] 刘洁,孟宝平,葛静,等.基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究[J].草业学报,2019,28(6):19-32.
- [11] 田惠文,毕如田,朱洪芬,等.汾河流域植被净初级生产力的驱动因素及梯度效应[J].生态学杂志,2019,38(10):3066-3074.
- [12] 陈斌,王绍强,刘荣高,等.中国陆地生态系统 NPP 模拟及空间格局分析[J].资源科学,2007,29(6):45-53.
- [13] 刘勇洪,权维俊,高燕虎.华北植被的净初级生产力研究及其时空格局分析[J].自然资源学报,2010,25(4):564-573.
- [14] Luo Y, Wang X, Li F, et al. Responses of grass production to precipitation in a mid-latitude typical steppe watershed[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(6):1595-1610.
- [15] 贾俊鹤,刘会玉,林振山.中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应[J].生态学报,2019,39(14):5058-5069.
- [16] 王强,张廷斌,易桂花,等.横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J].生态学报,2017,37(9):3084-3095.
- [17] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J].应用生态学报,2019,30(7):2309-2319.
- [18] 韩王亚,张超,曾源,等.2000—2015 年拉萨河流域 NPP 时空变化及驱动因子[J].生态学报,2018,38(24):8787-8798.
- [19] 赵晓,周文佐,田罗,等.土地利用变化对三峡库区重庆段植被净初级生产力的影响[J].生态学报,2018,38(21):7658-7668.
- [20] 周妍妍,朱敏翔,郭晓娟,等.疏勒河流域气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对影响评价[J].生态学报,2019,39(14):5127-5137.
- [21] Wei B, Xie Y, Jia X, et al. Land use/land cover change and its impacts on diurnal temperature range over the agricultural pastoral ecotone of Northern China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(9):3009-3020.
- [22] 赵松乔.察北、察盟及锡盟:一个农牧过渡地区的经济地理调查[J].地理学报,1953,19(1):43-60.
- [23] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等.北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J].地球科学进展,2002,17(5):739-747.
- [24] 刘志红,McVicar T R, Li L T,等.基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(10):227-234.
- [25] 朱文泉,潘耀忠,龙中华,等.基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算:以中国内蒙古为例[J].遥感学报,2005,9(3):300-307.
- [26] 李萌萌.基于 CASA 模型的陕西省 NPP 反演及其与气象因子的关系[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [27] Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. A global land primary productivity and phytogeography model[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995,9(4):471-490.
- [28] Hunt Jr E R, Piper S C, Nemani R, et al. Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO₂ concentrations predicted by an ecosystem process model and three-dimensional atmospheric transport model[J]. Global Biogeochemical Cycles,1996,10(3):431-456.
- [29] 鲁晖.2000—2017 年河西地区植被覆盖的时空过程分析[D].兰州:兰州大学,2019.
- [30] 王丽霞,余东洋,刘招,等.渭河流域 NDVI 与气候因子时空变化及相关性研究[J].水土保持研究,2019,26(2):249-254.
- [31] 郭继凯,吴秀芹,董贵华,等.基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析[J].干旱区研究,2017,34(3):621-629.