DOI: 10.20103/j.stxb.202207081948
连浩宇,李愈哲.退耕还草对锡林郭勒草原总初级生产力变化的影响.生态学报,2023,43(23):9733-9744.
Lian H Y, Li Y Z.Changes of gross primary productivity induced by returning farmland to grassland in Xilin Gol Grassland.Acta Ecologica Sinica,2023,43(23):9733-9744.

退耕还草对锡林郭勒草原总初级生产力变化的影响

连浩宇[1,2],李愈哲[1,*]
1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室,北京　100101
2 中国人民大学公共管理学院,北京　100872

摘要:内蒙古草原是我国重要的生态保护屏障,部分区域是农牧交错带的重要组成部分。锡林郭勒草原位于内蒙古东中部,属典型温性草原,深入开展退耕还草对其植被总初级生产力(GPP)的影响、探究相关环境因子,对深入了解退耕还草过程中区域植被生长状况变化和生物固碳潜力时空分布以及制定更加科学精准的退耕政策具有重要意义。基于遥感、气象观测和土地利用数据,采用残差分析和相关性分析方法,系统研究了 2010—2015 年间锡林郭勒草原退耕还草区域的植被 GPP 变化特征,并探讨了不同环境因子对 GPP 变化量的影响,揭示了退耕还草活动造成的 GPP 变化特征及其受环境因子影响的作用机制。结果发现:(1)锡林郭勒盟退耕还草区域 5 年内 GPP 平均变化量为 0.47 g C/m^2,其中 GPP 增加面积占退耕还草总面积的 67.2%,退耕还草初期 GPP 变化不显著;(2)退耕还草区域内,土壤含水量和土壤有机碳与 GPP 变化量显著负相关,而气温、降水、高程和坡度均与 GPP 变化量显著正相关;(3)坡度和土壤含水量与 GPP 变化量的相关程度最强,对退耕还草后 GPP 变化的影响程度较高。

关键词:植被总初级生产力;固碳潜力;残差分析;相关性分析;锡林郭勒草原

Changes of gross primary productivity induced by returning farmland to grassland in Xilin Gol Grassland

LIAN Haoyu[1,2], LI Yuzhe[1,*]
1 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*
2 *School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing* 100872, *China*

Abstract: Inner Mongolia grassland is an important ecological protection barrier in China and part of it is the important agro-pastoral ecotone, but it is dry and windy, with fragile surface material structure, strong soil erosion, and extremely fragile ecological environment. Located in the mid-eastern Inner Mongolia grassland, Xilin Gol Grassland is a typical temperate grassland. In-depth research on the impact of returning farmland to grassland on the gross primary productivity (GPP) of land vegetation in Xilin Gol Grassland and related environmental factors is of great significance to understand the regional vegetation growth status and biological carbon sequestration capacity in the project of returning farmland to grassland as well as to formulate scientific policies for returning farmland to grassland. We use the VI model to estimate the GPP change in the Xilingol Grassland Conversion Area from 2010 to 2015. Based on MODIS remote sensing data, ground observation data, environmental factor data and land use data, this paper systematically studied the characteristics of the GPP change of land vegetation in the area of returning farmland to grassland in Xilin Gol Grassland from 2010 to 2015 by using residual analysis, correlation analysis and partial correlation analysis, and discussed the impact of different environmental factors on the GPP change, and revealed the characteristics of the GPP change and the active mechanism of

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0802402, 2021YFD1300501);国家自然科学基金项目(41971276)
收稿日期:2022-07-08;　　**网络出版日期**:2023-08-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liyuzhe@ igsnrr.ac.cn

environmental factors after returning farmland to grassland. The results showed that: (1) the average GPP change in the area of returning farmland to grassland in Xilin Gol League within 5 years was 0.47 g C/m^2, in which the area with an increased GPP accounted for 67.2% of the total area of returning farmland to grassland, and the GPP change in the initial stage of returning farmland to grassland was not significant; (2) In the area of returning farmland to grassland, soil water content and soil organic carbon were significantly negatively correlated with the GPP change, while air temperature, precipitation, elevation, and slope were significantly positively correlated with the GPP change, and there is no significant correlation between soil nitrogen content, soil phosphorus content, and soil potassium content with GPP change; (3) Slope and soil water content had the strongest correlation with the GPP change, and had a higher impact on the GPP change after returning farmland to grassland, precipitation and oil organic carbon had the strongest correlation with the GPP change, environmental conditions have a significant impact on the GPP change after returning farmland to grassland.

Key Words: gross primary productivity; carbon sequestration potential; residual analysis; correlation analysis; Xilin Gol Grassland

固碳是陆地生态系统一项重要的服务功能,地表植被通过光合作用吸收空气中的 CO_2并固定有机碳,可以减少温室效应、调节生态平衡、联系大气和陆地的物质能量交换[1]。定量评估陆地生态系统的固碳潜力是区域性碳汇管理和气候调节的基础[2],也是碳达峰碳中和战略背景下的热点问题[3]。其中,陆地植物总初级生产力(GPP)是全球最大的碳通量,描述了单位时间内绿色植物通过光合作用所固定的有机碳量,是定量化生态系统固碳潜力的关键参数[4]。GPP 决定了进入陆地生态系统的初始物质和能量,可以反映植被整体的生长状况和固碳潜力[5];它受气候变化影响的同时,对气候系统具有反馈作用,可用于分析固碳过程带来的气候效应[6]。

随着近年遥感技术的发展,利用模型估算区域尺度 GPP 成为了一种重要且普遍的研究方法[7]。GPP 估算模型包括植被光合作用模型(VPM)和植被光合作用和呼吸模型(VPRM)等光能利用率模型[8],回归树模型等统计模型[9]以及生物群落-生物地球化学循环模型(Biome-BGC Model)等过程模型[10]。其中,VI 模型由 Wu 等在 2010 年建立,该模型基于植被指数和光合有效辐射(PAR)进行估算 GPP,模型中的光合有效辐射分量(FPAR)与植被光能利用率(LUE)均通过植被指数进行量化,并将此方法应用到玉米地的 GPP 估算[11]。VI 模型估算的 GPP 已经过大量的地面验证和地面校准工作,具有较高的数据精度,适宜做大尺度区域 GPP 的时空变化研究。王克清等[12]结合中国通量观测研究联盟(ChinaFLUX)的台站数据,对中国典型植被类型的 GPP 进行了模拟,其中 VI 模型在锡林郭勒温性高原的模拟值与实测值相关系数 R^2 达到 0.86,模拟效果良好。

内蒙古草原属北方温性草原,是我国重要的防沙治沙屏障,具有涵养水源、净化环境作用。同时,内蒙古草原干燥多风沙、地表物质结构脆弱、土壤侵蚀强烈,生态环境极其脆弱[13—15]。本世纪初,全盟风蚀沙化面积 12.6 km^2,占全盟草原总面积的 64%,其中强度风蚀沙化面积 1.48 km^2,植被覆盖率下降至 27.2%;同时水土流失呈加剧趋势,全盟轻度以上的水土流失面积 17.2 km^2,占总土地面积的 81.2%;其中浑善达克沙地从 1949 年到 1995 年沙漠化面积由 0.57 万 km^{2}增加到 3.05 万 km^2,平均每年以 100 km^{2}多的速度增加。

为了改善内蒙古草原的生态环境,我国政府开展了一系列生态修复工程,在锡林郭勒盟实施的退耕还林(还草)工程,在农牧交错带主要进行退耕还草[16]。随着“退耕还草工程”的开展,锡林郭勒草原的耕地面积明显减少[17],其中 63.95%的耕地转化为草地[18]。截至 2015 年,全盟植被覆盖率上升至 49.66%,产草量达到 3.89 kg/hm^2,重度沙漠化与中度沙漠化面积均有下降。

许多学者研究发现退耕还草可以显著提高草地植被数量,增加土壤养分和有机碳含量[19],增加土壤水分和碳固存[20],在退耕还草中期有显著的碳氮增汇效应[21]。但是目前关于 GPP 变化量与气候、土壤、地形等环境因子间响应机制的研究并不多见,对退耕还草后 GPP 变化的影响因素也缺乏控制变量的研究。基于此,研

究利用 VI 模型对 2010—2015 年锡林郭勒草原退耕还草区域 GPP 变化量进行估算,并与同时期锡林郭勒草原各环境因子进行相关性分析,定量评估环境因子对退耕还草前后 GPP 变化量的影响。本研究有利于掌握退耕还草前后 GPP 的变化,明确退耕还草后 GPP 变化与环境因子的关系,为内蒙古草原退耕还草政策的制定提供科学基础和决策依据,为我国草原生态治理和区域碳中和提供建议。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于中国内蒙古自治区锡林郭勒盟(42°32′—46°41′N,111°59′—120°00′E)(图 1),地势南高北低,南部为低山丘陵,北部为平缓的波状平原,总面积大致为 14785 km^2。研究区地处中温带半湿润到半干旱气候区,属中温带半干旱大陆性气候,年平均气温为 0.6℃,年平均降水量 294.9 mm。研究区内可利用草场面积 138.56 万 hm^2、耕地 17085 hm^2,草原类型较为丰富,地跨草甸草原、典型草原和沙丘沙地草原,栗钙土为主要土壤类型[22]。本研究设立的两个涡度相关观测系统分别位于典型温性草原的草地生态系统(43°32′24″N,116°33′43″E)和农田生态系统(43°35′20″N,116°45′43″E)的中心地带,设立地块地形相对较平缓,草地植被建群种为大针茅(*Stipa grandis*);农田生态系统种植作物为小麦(*Triticum aestivuml*),种植区域不进行灌溉,在作物种植前施有机肥(表 1)。

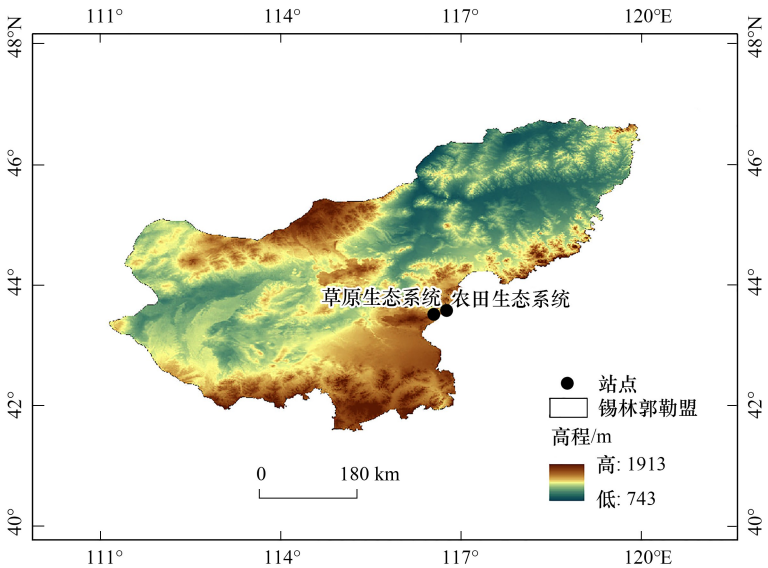

图 1　研究区概况图

Fig.1　Study area and the spatial distribution of meteorological stations

表 1　草地和农田生态系统植被和土壤特征差异

Table 1　Differences in vegetation and soil characteristics between grass land and farmland ecosystems

生态系统类型分布 Ecosystem type distribution	草地 Grass land	农田 Farm land
建群种 Ecosystem type distribution	大针茅 *S.grandis*	小麦 *T.aestivum*
平均高度 Average height /cm	14.75±0.95a	89.00±1.29b
土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	11.98±1.73a	19.77±1.05b
总生物量 (干重)Total biomass(dry weight)/(kg/m^2)	2.04±0.14b	1.02±0.06a
地上/地下生物量 Above/below biomass /%	3.73±0.20a	64.50±2.24b
凋落物 Litter/(g/m^2)	1.60±0.55a	10.98±1.00b

均值±标准误;同行不同字母代表相互间差异显著(P<0.05)

锡林郭勒盟高程在 760—1911 m,坡度主要在 0°—2°,平均海拔在 1000 m 以上,最高峰是西乌珠穆沁旗内的古如格苏乌拉峰;地势南高北低,自西南向东北倾斜,东南处地势最高,东北处地势最低(图 2)。西部和北部地形平坦,东南部多低山丘陵,盆地错落其间,形成广阔的高原草场;东北部和东部地区以低山丘陵、高平原和宽谷平原为主,是森林向草原的过渡地段。

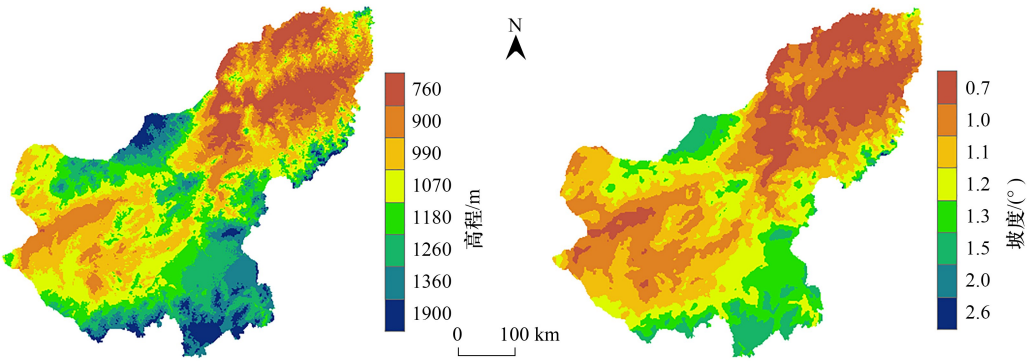

图 2 高程和坡度的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of elevation and slope

锡林郭勒盟属中温带干旱、半干旱大陆性季风气候,年平均降水量在 99.58—531.29 mm,其中东部降水较多,大兴安岭余脉西坡及阴山余脉北坡局部地区在 400 mm 以上,西部降水较少,局部不足 150 mm;锡盟年平均气温在-4.76—4.90℃,西南部气温较高,东北部气温较低,北部中蒙边境地区和灰腾梁一带年平均气温 0℃以下(图 3)。

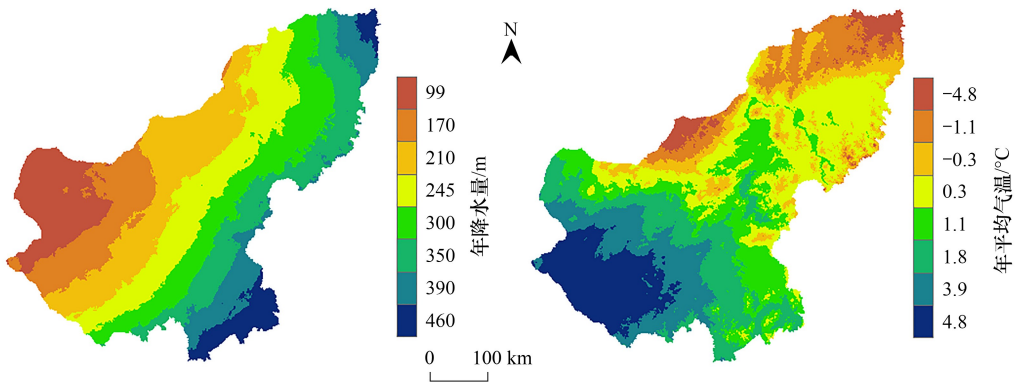

图 3 多年平均降水和气温的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of annual mean precipitation and air temperature

锡林郭勒盟的土壤水分在 0.07—0.20 m^3/m^3,其中东部土壤含水量较高,西部土壤含水量较低,与降水量由西向东递增有关;锡盟有机碳含量在 0.20—5.98 g/kg,其中西南部有机碳含量较低,主要是荒漠草原,中部有机碳含量在 10.00—20.00 g/kg,主要是典型草原,东部有机碳含量较高,平均在 20.00 g/kg 以上,主要为草甸草原,土壤有机碳含量与草原类型呈一致分布(图 4)。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 遥感数据

本研究的遥感数据来源于美国航空航天局(NASA)(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov)提供的 Modis/Terra 卫星遥感产品 MOD09A1,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d,数据选取编号为 h26v04 的影像,产品数据下载后需要对遥感数据进行格式转换与投影变换。同时,本研究选择时域线性插值的方法对数

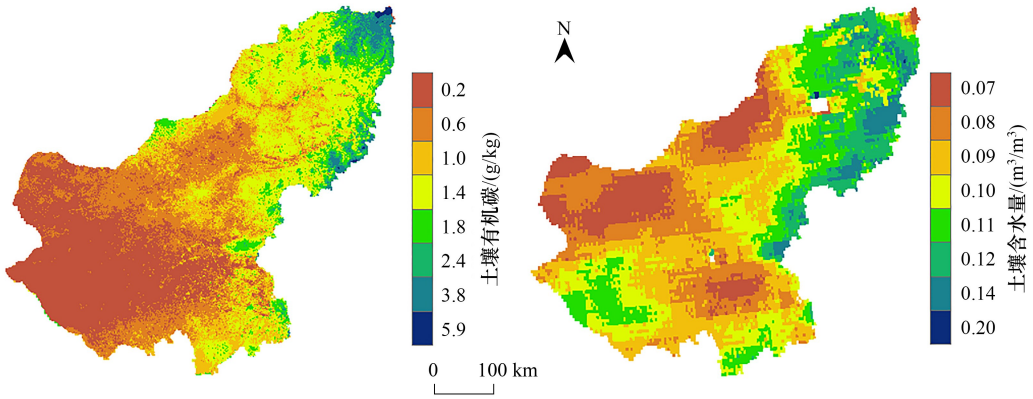

图 4　土壤含水量与土壤有机碳的空间分布

Fig.4　Spatial distribution of Soil water and soil organic carbon

据中的异常值进行修复,采用 Savitzky-Golay 滤波法对遥感数据进行平滑处理,表达式为:

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{m} C_i \times Y_{j+i}}{N} \tag{1}$$

式中, Y_j^* 为拟合值, Y_{j+i} 为像元原始值, C_i 为第 i 个值滤波时的系数, m 为半个滤波窗口的宽度, N 为滤波器长度,等于滑动数组的宽度 $2m + 1$。对于不同空间分辨率的栅格影像数据,采用重采样统一空间分辨率。

1.2.2　环境因子数据

本研究所采用的高程,气温,降水数据,均来自中国科学院地理科学与资源研究所的资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)。其中,海拔高度(DEM)空间分布数据是基于的航天飞机雷达地形高程数据(SRTM V4.1)经整理拼接生成的 90 m 的栅格数据,采用 WGS1984 椭球投影。土地利用数据(LUCC)是在 2010 年土地利用遥感监测数据的基础上,基于 Landsat 遥感影像,通过人工目视解译生成,空间分辨率为 1000 m。

本研究使用的坡度、土壤水分、土壤有机碳、土壤全氮、全磷、全钾含量数据均来自国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/),其中坡度数据的空间分辨率为 1000 m,将 DEM 原始数据通过投影转换、图幅拼接、数据重采样、数据裁剪,最后将投影拼接后的 SRTM 数据进行坡度计算得到。土壤数据的时间尺度为 2010—2015 年,空间分辨率为 1000 m,通过 Arcgis 10.7 软件裁剪至研究区范围,利用栅格投影统一坐标系,最终得到锡林郭勒盟土壤数据集。

1.2.3　地面观测数据

本研究通过在研究区内站点设置通量塔获得实际 GPP 数据,通量观测塔分别位于草地生态系统和农田生态系统的中心区域。利用中国通量观测研究联盟(ChinaFLUX)提供的程序对涡度相关系统观测的原始采样数据进行处理,包括剔除野点、密度效应校正(WPL)、坐标轴 3 次旋转变化修正等,得到采样间隔为 30 min 的 GPP 数据。研究区内草地和农田站点的能量闭合度分别为 82.3%和 81.6%,GPP 观测数据质量较好,处于国际中上水平[23]。

1.2.4　土地利用类型数据

本研究采用的土地利用类型数据来自中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx),研究数据为 2010 年及 2015 年地利用现状遥感监测栅格数据,空间分辨率为 1000 m。土地类型包括了耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型以及 25 个二级类型。

1.3 数据分析与检验方法

1.3.1 GPP 计算

本文选用 VI 模型估算 GPP。由于 VI 模型仅有植被指数(EVI)和光合有效辐射(PAR)两个模型驱动参数,结构较为简单。计算公式为:

$$GPP = (EVI \times EVI \times PAR) \times m \tag{2}$$

式中,的参数 m 为光合转换系数,随植被类型和环境而变化,同时通过模型标定得到,是模拟 GPP 与站点实测 GPP 线性拟合曲线的斜率。

本研究所用 PAR 数据基于研究区及其周围气象站点的观测数据(观测数据来自国家气象局网站 http://data.cma.cn/),利用 ANUSPLIN 插值软件,结合数字高程模型(数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 SRTM),经过空间插值获取得到。

本研究所用植被指数 EVI 由 MODIS 遥感数据的地表反射率产品计算得到的。其中,MODIS 格网范围在 H26V04,使用的遥感产品为地表反射率产品 MOD09A1;EVI 考虑了蓝光波段,增强了对植被覆盖度变化的敏感性,具体计算公式如下:

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + (6 \times \rho_{RED} - 7.5 \times \rho_{BLUE}) + 1} \tag{3}$$

式中,ρ_{NIR} 代表近红外(841—876 nm)波段,ρ_{RED} 代表红光(620—570 nm)波段,ρ_{BLUE} 为蓝光(459—479 nm)波段。

1.3.2 残差分析法

本研究采用 Evans 和 Geerken 提出的残差分析法[24],逐像元量化退耕还草对 GPP 的影响。首先对锡林郭勒盟 2010—2015 年退耕还草的区域,基于 1985—2010 年的气温,降水和 GPP 数据,逐像元建立 GPP 与年平均降水量,年平均气温的回归模型。其中,1985—2010 年的 GPP 数据由 VI 模型计算得到。随后将 2015 年平均降水量和平均气温代入模型,获得退耕还草区域 2015 年 GPP 预测值(GPP_{pre}),所得 GPP 预测值只受气候变化影响。随后通过遥感观测退耕还草区域 2015 年 PAR 和 EVI 数据,利用 VI 模型,得到 2015 年的 GPP 实际值(GPP_{real}),GPP 实际值受到气候变化与退耕还草的共同影响,整体上高于 GPP 预测值,具体结果如下(图 5):

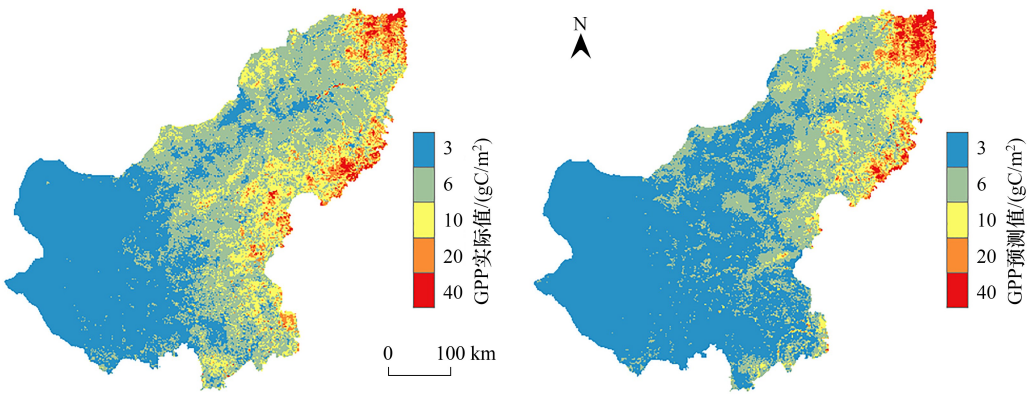

图 5 GPP 实际值与预测值

Fig.5 GPP real value and predictive value

GPP:总初级生产力 Gross primary productivity

最后得到 GPP 实际值与 GPP 预测值之间的残差序列即为 GPP 变化量(ε)。GPP 变化量可以反映不受气候影响,仅由退耕还草造成的 GPP 变化。残差分析表达式为:

$$\varepsilon = GPP_{real} - GPP_{pre} \tag{4}$$

$$GPP_{pre} = aT + bP + c \tag{5}$$

式中,GPP_{real}为 2015 年 GPP 的实际值,GPP_{pre}为 2015 年 GPP 的预测值; a 、b 分别为 GPP 对气温和降水量的回归系数; c 为回归常数项; T 表示气温,℃; P 表示降水,mm; $\varepsilon > 0$ 表示退耕还草对 GPP 有增加作用, $\varepsilon < 0$ 表示退耕还草对 GPP 有减少作用, $\varepsilon = 0$ 表示退耕还草不改变 GPP。

1.3.3　相关性分析

本研究采用 SPSS 26.0 对 GPP 变化量与各环境因子进行 Pearson 相关分析,偏相关分析和复相关分析。涉及样本共计 379 个,均为研究区内管理方式发生转变的退耕还草涉及地块,每个像元点对应一组环境因子数据及 GPP 变化量。

2　结果

2.1　VI 模型精度评价

本文通过比较锡林浩特市内草地站点和农田站点的实测 GPP 与理论 GPP 进行模型精度分析。总体上看,VI 模型模拟的 GPP 值与涡度相关系统的测量值有较强的一致性,说明在 8 d 尺度上 VI 模型可以利用 EVI 与 PAR 较好地模拟出不同站点 GPP 的变化。

VI 模型的模拟精度受不同土地利用方式的影响,2010 年与 2015 年在草地区模型模拟的 GPP 值与实测 GPP 值在线性回归方程中 R^2 为 0.79,均方根误差(RMSE)为 1.46 g C/m^2,模拟值与观测值之间离散程度较低(图 6)。农田生态系统区 GPP 模拟值与实测值的线性回归方程中 R^2 为 0.68,RMSE 为 2.78 g C/m^2。检验结果说明 VI 模型对 GPP 的拟合情况较好,模拟 GPP 与实际 GPP 的误差较小,同时草地区的拟合精度高于农田区。

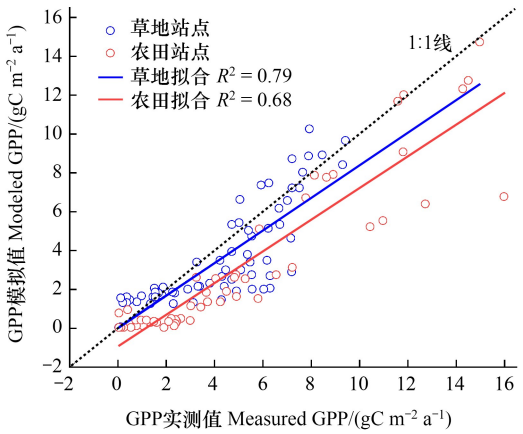

图 6　VI 模型站点模拟结果

Fig.6　VI model site simulation results

GPP: 总初级生产力 Gross primary productivity; VI 模型:植被指数模型 Vegetation index model

草地站点模型模拟值与实测值之间线性拟合直线的斜率为 0.79,很大部分模拟值与实测值的分布低于 1∶1 直线;农田站点 GPP 模拟结果与实测结果的线性拟合直线的斜率为 0.68,模拟值与实测值的拟合线略低于 1∶1 直线,是 VI 模型未考虑 LAI 变化对植被的影响,造成了 GPP 值的低估[25]。

2.2　退耕还草区域 GPP 变化量

2010—2015 年,锡林郭勒盟退耕还草区域的 GPP 总体稳定,退耕区域内 GPP 变化量平均值为 0.47 g C m^{-2} d^{-1}。其中 GPP 增加的区域占研究区面积的 67.20%,GPP 平均增加 1.98 g C m^{-2} d^{-1},最多增加 10.16;GPP 降低的区域占研究区面积的 32.80%,GPP 平均减少 3.39 g C m^{-2} d^{-1},最多减少 16.71 g C m^{-2} d^{-1}(表 2)。

表 2　GPP 变化情况

Table 2　GPP variation

GPP 变化情况 GPP changes	像元数/个 Pixel numbers	GPP 变化量平均值 GPP average variation/(g C m^{-2} d^{-1})	所占比例 Proportion/%
GPP 增加 GPP increase	254	1.98	67.20
GPP 减少 GPP decrease	124	3.39	32.80
总计 Total	378	0.47	100

GPP:总初级生产力 Gross primary productivity

2.3 退耕还草区域的空间布局

本研究通过比较锡林郭勒盟 2010 年及 2015 年土地利用类型数据,计算 5 年内各行政区耕地变为草地的面积。2010 年—2015 年锡林郭勒草原退耕还草区域共 128.23 km^2(表 3),退耕还草区域主要集中在锡林郭勒盟南部,东北部也有零星分布,以东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、锡林浩特市、正蓝旗、多伦县、正镶白旗和太仆寺旗为主。

表 3 退耕还草面积

Table 3 Area of returning farmland to grassland

行政区 Districts	耕地面积 Cultivated area/km^2	退耕还草面积 Conversion area/km^2	退耕还草比例 Proportion/%
东乌尔穆沁旗 East urmuqin banner	292.76	2.65	0.91
西乌尔穆沁旗 West urmuqin banner	186.20	13.05	7.01
锡林浩特市 Xilinhot	218.73	4.17	1.91
正蓝旗 Zhenglan Banner	193.16	11.80	6.11
多伦县 Duolun County	448.67	8.29	0.23
正镶白旗 Zhengxiangbai Banner	136.68	3.96	2.90
太仆寺旗 Taibus Banner	678.50	13.55	2.00

2.4 退耕还草 GPP 变化量的影响因素

为了探究决定退耕还草后 GPP 变化量的主要环境因子,用回归分析来确定退耕还草区域内 GPP 变化量与环境因子的关系。结果表明,气温、降水、高程、坡度均与 GPP 变化量呈线性负相关($P<0.01$,表 4);土壤含水量、土壤有机碳均与 GPP 变化量呈线性正相关($P<0.01$,表 4);土壤氮含量、土壤磷含量、土壤钾含量则与 GPP 变化量之间的关系不显著($P>0.05$,表 4)。

表 4 GPP 变化量与环境因子相关性

Table 4 Correlation between GPP variation and environmental factors

环境因子 Environmental factors	*df*	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance level
气温 Air temperature	378	0.505	0.000
降水量 Precipitation		0.400	0.000
高程 Altitude		0.483	0.000
坡度 Slope		0.586	0.000
土壤含水量 Soil moisture		−0.374	0.000
土壤有机碳 Soil organic carbon		−0.386	0.000
土壤氮含量 Soil nitrogen content		−0.055	0.146
土壤磷含量 Soil phosphorus content		−0.037	0.213
土壤钾含量 Soil potassium content		−0.152	0.079

通过偏相关分析进行环境因子的进一步筛选发现,坡度和土壤含水量是影响 GPP 变化量最主要的因素($P<0.01$);高程和气温与 GPP 变化量也有显著偏相关,但偏相关性较弱($P<0.01$,表 5);降水量和土壤有机碳与 GPP 变化量无显著偏相关($P>0.05$,表 5)。以上述六种环境因子与 GPP 变化量建立线性回归模型,模型的复相关系数为 0.652,达到极显著水平($P<0.01$,表 5),说明环境条件对退耕还草后 GPP 的变化量有显著影响。

3 讨论

3.1 退耕还草对 GPP 的影响

2010—2015 年,锡林郭勒盟退耕还草区域的 GPP 总体稳定,GPP 变化不显著。Jiang 等研究了近 30 年来

黄土高原典型黄土区植被生产力时空变异,发现其整体呈现上升趋势,但以 2006 为断点,在此前 30%—40%的植被区域表现出植被生产力损失,随后逐渐恢复[26]。此外,Feng 等针对黄土高原退耕还草工程进行研究,发现植被生产力稳步上升,并在 2016 年上升趋势趋强[27]。本研究表明 5 年内锡林郭勒草原退耕还草区域 GPP 变化不显著,部分地区 GPP 有所下降,退耕还草区域的 GPP 平均值仅略微上升。这一与其它区域有所不同的现象归咎于区域涉及退耕还草的地块相对更少,同时在温性草原退耕还草对于 GPP 的影响弱于其它区域和植被类型,即研究区开垦地块表现出的 GPP 未大幅低于其自然状态植被。这一现象是否具有更大时空范围的普遍性,后续研究可以通过分析更长时段的退耕还草措施持续时间、扩大研究区范围进行验证探讨。

表 5　GPP 变化量与环境因子偏相关性

Table 5　Partial correlation between GPP variation and environmental factors

环境因子 Environmental factors	*df*	偏相关系数 Partial correlation coefficient	显著性水平 Significance level
气温 Air temperature	378	0.163	0.001
降水量 Precipitation		-0.045	0.195
高程 Altitude		0.191	0.000
坡度 Slope		0.298	0.000
土壤含水量 Soil moisture		-0.263	0.000
土壤有机碳 Soil organic carbon		-0.077	0.069

此外,有研究表明退耕还林、草地治理等其它工程措施也可以不同程度提高 GPP。任小玢[28]对宁夏草地变化的研究表明,耕地扩张等人为活动是导致草地退化的绝对主导因素,而草地治理,退耕还草等生态保护政策可以有效提高温性草原的植被生产力。茆杨等[29]对西南地区植被初级生产力时空变化的研究发现,退耕还林可以显著提高植被初级生产力,同时植被生产力的提高与累计造林面积存在显著关联。系列结果不仅暗示不同工程措施的 GPP 影响存在极大的区域性差异,还表明研究区 GPP 变化与工程措施所涉面积紧密相关,在退耕还草实施力度和规模较大的区域仍对区域 GPP 产生更大程度的改变。

3.2　环境因子对 GPP 变化量的影响

本研究发现土壤含水量和土壤有机碳均与 GPP 变化显著负相关(表 4, $P<0.05$),气温、降水、高程和坡度均与 GPP 变化量显著正相关(表 4, $P<0.05$)。研究发现水热条件较好的耕地,退耕后 GPP 呈上升趋势,与 Liu 等[30]针对黄土高原退耕还草工程的研究结论一致,即植被初级生产力并非在所有区域都呈现出生态恢复的状态,而只是在水热条件较好的区域增加。刘洋洋也发现退耕后植被生产力在不同类型以及不同地形下的草地变化趋势存在差异,降雨、人为活动是驱动其变化的主要因素[31];退耕后植被初级生产力变化在不同空间上的恢复状态、速率不同,在不同时间段的恢复状态、速率也不同[30]。这表明在未来退耕还草实施过程中,综合考虑实施地块的环境因子将有助于遴选出更具恢复价值和潜力的地块,在水热条件较好区域实施退耕还草能够更大程度增加区域的 GPP。此外,不同植被类型下,GPP 对相同气候因子的响应程度存在差异,王大为等[32]研究表明,落叶阔叶林和常绿针叶林 GPP 主要受蒸发和相对湿度影响,草地主要受降水量影响,耕地主要受平均气温影响,灌木林、湿地和荒漠植被主要受水汽压影响,且越靠近干旱地区,水汽压对 GPP 的影响越强。

同时研究还发现,地势较高,坡度陡峭的区域退耕后 GPP 呈现上升趋势。这一现象与彭文英等发现渭河流域在 25°的坡度上退耕还林效果最大化结论相似[33],说明在退耕实施中应优先退耕坡度较高的耕地。最后,土壤含水量较高的耕地退耕后 GPP 呈下降趋势。这是灌溉农田表现土壤含水量较高,显著高于自然退耕还草地和周边天然草地[34];相应地块退耕后土壤水分损失较大,从而造成退耕后草地 GPP 形成一定水分限制而下降[35]。由此可见,不恰当的实施退耕还草在部分区域和地块可能对草原的初级生产力和固碳潜力产生负面影响[36]。为更好实现退耕还草最优的生态效益,应合理选择退耕区域,减少退耕初期植被生产力损失,提高草原固碳潜力。

3.3 退耕还草对生态系统固碳潜力的影响

草地生态系统固碳主要通过光合作用将大气中的二氧化碳转化为有机碳,固定在植物体内或土壤中;而GPP反映了植物在生态系统水平上通过光合作用初始固定的有机碳总量,代表植物的光合生产能力,可以较好地量化生态系统的固碳潜力。锡林郭勒草原在退耕还草5年内,大部分地区GPP呈上升趋势,但GPP总量变化不显著(表2);毛绍娟等对日喀则河谷退耕还草工程的研究表明,退耕初期由于植物种单一,植被地上碳密度较低,随着退耕时期延长,植被碳密度有所增加,生态系统固碳潜力提高[37]。其中,2010—2015年退耕还草造成的GPP变化量有限,固碳潜力提高不明显,与没有建立有效的侵蚀控制机制,以及与退耕初期施肥的干扰作用有关[38]。此外,水热条件较好的耕地,退耕后固碳潜力提高显著(表4),与马南方等的研究结果类似,其结果显示退耕后固碳效益与气候密切相关,越湿润的地方退耕后固碳收益越显著[39];邹婧汝的研究也发现适宜的气温和降水有利于退耕后次生草地的有机物积累和植物萌发,加快植被对土壤养分的吸收,提高草地群落的多样性,对植被生产力和生态系统固碳有正向作用[40]。结合本研究的结果(表4),退耕区水热条件是影响草地退耕后固碳收益的最重要影响因素。在退耕还草措施以外,区域的整体GPP在研究期间还受到草原生态修复和补助奖励等其他非工程措施性政策因素的影响,其贡献和作用机还需更深入的研究加以剥离量化。

退耕还草通过播种优良牧草,提高植被高度、盖度和生物量,改善植物群落结构[41],增加了植物群落的光合速率和叶面积指数[42],有利于生态系统的碳固存[43];同时农地转变为多年生植被后,可以有效防控土壤侵蚀,改善土壤的物理、化学以及生物学质量,提高植被固碳效益[44]。研究表明,在<450mm降雨带(如锡林郭勒草原),土壤水分不足以支撑乔灌的正常生长,区域生态系统碳的增加多集中在草地生物量中[45];经过长期封育退耕,植被恢复后,枯落物积累量增多,加之土壤微生物和土壤酶的作用,退耕还草区域的土壤有机碳密度能显著高于周边原生草地[46]。关于退耕还草后固碳潜力随时间的变化,史利江等的研究表明从短期(<20 a)来看,退耕还林(草)的土壤固碳效应不明显,20 a后随着恢复年限的增加,植被的土壤碳氮增汇效应显著[21];许明祥等则认为以10 a为界,退耕还草的短期土壤碳增汇效应不明显,而10 a后土壤碳增汇效应逐渐明显[47]。相关研究均认为短期内退耕还草的固碳效益并未显著高于农田,与本研究结果相互印证,但为了进一步摸清区域长期退耕的效果,还需要未来对退耕后更长时段进行更深入分析与研究。

4 结论

本文以MODIS GPP数据为基础,系统研究了锡林郭勒草原2010—2015年退耕还草区域GPP的变化特征,并探讨了退耕还草后GPP变化与主要气候因子的关系,获得结论如下:

(1)2010—2015年,锡林郭勒盟退耕还草区域的GPP总体稳定,GPP变化量平均值为0.47 g C/m^2,没有显著上升趋势。其中GPP增加的区域占研究区面积的67.20%,GPP降低的区域占研究区面积的32.80%;GPP变化量最大值为10.16 g C/m^2,最小值为-16.71 g C/m^2。

(2)锡林郭勒草原退耕还草5年内,退耕区域的土壤含水量和土壤有机碳与GPP变化量显著负相关,气温、降水、高程和坡度均与GPP变化量显著正相关,其中土壤含水量和坡度对GPP变化量的影响最大;可见退耕时应优先选择水热条件好,坡度较高低的耕地,减少退耕初期GPP的损失,增加固碳效益。

参考文献(References):

[1] 赵俊芳, 曹云, 马建勇, 姜月清. 基于遥感和FORCCHN的中国森林生态系统NPP及生态服务功能评估. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1585-1592.

[2] 刘迎春, 于贵瑞, 王秋凤, 张扬建, 徐泽鸿. 基于成熟林生物量整合分析中国森林碳容量和固碳潜力. 中国科学: 生命科学, 2015, 45(2): 210-222.

[3] 曾伟生. 东北落叶松林碳储量生长模型研建及固碳能力分析. 林业资源管理, 2022(1): 18-23.

[4] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学: D辑, 2007(6): 804-812.

[5] 叶许春, 杨晓霞, 刘福红, 吴娟, 刘佳. 长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子. 生态学报, 2021, 41(17): 6949-6959.

[6] 宋永鹏, 唐希颖, 贾亚敏, 刘小燕, 崔耀平. 甘南地区二氧化碳施肥效应对生态系统的影响. 生态学报, 2021, 41(18): 7301-7311.

[7] 徐博轩, 陈报章, 许光, 陈婧, 车明亮. 基于叶面积指数估算植被总初级生产力. 生态学报, 2016, 36(12): 3546-3555.

[8] 平晓莹, 马俊, 刘淼, 常禹, 宗敏, 熊在平. 基于 VPM 模型的长白山自然保护区植被总初级生产力动态变化. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1589-1598.

[9] Zhang L, Wylie B, Loveland T, Fosnight E, Tieszen L L, Ji L, Gilmanov T. Evaluation and comparison of gross primary production estimates for the Northern Great Plains grasslands. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(2): 173-189.

[10] 郑磊, 宋世凯, 袁秀亮, 董嘉琪, 李龙辉. 基于 Biome-BGC 模型和集合卡尔曼滤波方法的阔叶红松林生态系统水碳通量模拟. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1752-1760.

[11] Wu C Y, Niu Z, Gao S. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D12): D12127.

[12] 王克清, 王鹤松, 孙建新. 遥感 GPP 模型在中国地区多站点的应用与比较. 植物生态学报, 2017, 41(3): 337-347.

[13] 刘良梧, 周建民, 刘多森, I.V.Ivanov, V.A.Gemkin, V.Y.Prikod′ko. 农牧交错带不同利用方式下草原土壤的变化. 土壤, 1998, 30(5): 225-229.

[14] 王静爱, 徐霞, 刘培芳. 中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究. 资源科学, 1999, 21(5): 19-24.

[15] 刘林德, 高玉葆. 论中国北方农牧交错带的生态环境建设与系统功能整合. 地球科学进展, 2002, 17(2): 174-181.

[16] 殷小菡, 孙希华, 徐新良, 张雪艳, 陈德超. 我国北方农牧交错带西段退耕对土壤保持功能影响研究. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1721-1732.

[17] 祝萍, 黄麟, 翟俊, 樊江文. 农牧交错带重点生态功能区草地载畜压力演变特征. 草业科学, 2022, 39(6): 1269-1279.

[18] 岳泓宇, 贾志斌, 梅宝玲, 田淑新. 内蒙古草原温室气体交换通量. 生态学报, 2016, 36(24): 7929-7941.

[19] 刘洪来, 张卫华, 王堃. 开垦对农牧交错带地带性和非地带性草地土壤性质的影响. 农业工程学报, 2009, 25(10): 272-277.

[20] 林枫, 王丽芳, 文琦. 黄土高原土壤有机碳固存对植被恢复的动态响应及其碳汇价值. 水土保持研究, 2021, 28(3): 53-58.

[21] 史利江, 高杉, 姚晓军, 张晓龙, 李文刚, 高峰. 晋西北黄土丘陵区不同植被恢复下的土壤碳氮累积特征. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1787-1796.

[22] 李愈哲, 樊江文, 于海玲. 京津风沙源治理工程不同恢复措施对草地恢复过程的差异性影响. 草业学报, 2018, 27(5): 1-14.

[23] 张良侠, 樊江文, 张文彦, 唐风沛. 京津风沙源治理工程对草地土壤有机碳库的影响——以内蒙古锡林郭勒盟为例. 应用生态学报, 2014, 25(2): 374-380.

[24] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human induced dry land degradation. Journal of aird Environment, 2004, 57(4): 535-554.

[25] 游浩妍, 骆成凤, 刘正军, 于秀娟. 基于 MODIS 植被指数估算青海湖流域植被覆盖度研究. 遥感信息, 2012, 27(5): 55-60, 66.

[26] Jiang X D, Shen W, Bai X Y. Response of net primary productivity to vegetation restoration in Chinese Loess Plateau during 1986-2015. PLoS One, 2019, 14(7): e0219270.

[27] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China′s Loess Plateau. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1-5.

[28] 任小玢, 张东海, 俞鸿千, 徐洁, 蒋齐, 王占军, 吴旭东. 气候变化和人为活动在宁夏草地变化中的相对作用. 生态学报, 2022, 42(19): 7989-8001.

[29] 茆杨, 蒋勇军, 张彩云, 乔伊娜, 吕同汝, 邱菊. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应. 生态学报, 2022, 42(7): 2878-2890.

[30] Liu F, Yan H M, Gu F X,Niu Z E.,Huang,M. Net primary productivity increased on the Loess Plateau following implementation of the Grain to Green Program. Journal of resources and ecology, 2017, 8(4): 413-422.

[31] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 刚成诚, 章钊颖, 同琳静, 李建龙. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309-2319.

[32] 王大为, 周伟, 韩涛, 李丽丽, 罗天旭, 李金山. 2000—2019 年石羊河流域植被总初级生产力变化及其气候特征. 生态学杂志, 2023, 42(2): 406-414.

[33] 彭文英, 张科利, 江忠善, 孔亚平. 黄土高原坡耕地退耕还草的水沙变化特征. 地理科学, 2002, (4): 397-402.

[34] 赵佰礼, 穆兴民, 高鹏, 赵广举, 孙文义, 田鹏. 黄土丘陵沟壑区不同退耕草地土壤水分研究. 水土保持研究, 2019, 26(4): 111-115.

[35] 常海涛, 赵娟, 刘佳楠, 刘任涛, 罗雅曦, 张静. 退耕还林与还草对土壤理化性质及分形特征的影响——以宁夏荒漠草原为例. 草业学报, 2019, 28(7): 14-25.

[36] 李愈哲, 邵全琴, 樊江文, 陈一, 陈智, 官惠玲, 张馨元. 开垦对放牧温性草原生态系统水分利用效率的影响. 草业学报, 2019, 28(10): 110-121.

[37] 毛绍娟, 李红琴, 张镱锂, 祝景彬, 张法伟, 李英年. 日喀则河谷退耕还草(林)工程实施后生态功能效应的初步分析. 草地学报, 2015, 23(6): 1278-1286.

[38] 陈峰, 李红波, 刘亚静. 基于 GIS 和 CASA 的滇南山区植被 NPP 时空分异及其影响因素——以云南省元阳县为例. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2148-2158.

[39] 马南方, 高晓东, 赵西宁, 赵连豪, 刘华清, 杨孟豪. 黄土丘陵区退耕小流域土壤有机碳分布特征及地形植被对其的影响. 生态学报, 2022, 42(14): 5838-5846.

[40] 邹婧汝, 赵新全. 围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影响. 草业科学, 2015, 32(11): 1748-1756.

[41] 李愈哲, 樊江文, 张良侠, 翟俊, 刘革非, 李佳. 不同土地利用方式对典型温性草原群落物种组成和多样性以及生产力的影响. 草业学报, 2013, 22(1): 1-9.

[42] 张海燕, 樊江文, 邵全琴, 张雅娴. 2000—2010 年中国退牧还草工程区生态系统宏观结构和质量及其动态变化. 草业学报, 2016, 25(4): 1-15.

[43] 李令, 贺慧丹, 未亚西, 杨永胜, 罗谨, 李红琴, 李英年, 周华坤. 三江源农牧交错区植被群落及土壤固碳持水能力对退耕还草措施的响应. 草业科学, 2017, 34(10): 1999-2008.

[44] 赵萌捷, 陈云明, 艾泽民, 曹扬, 徐敬华. 黄土丘陵区典型人工林有机碳分布特征及其影响因素. 水土保持通报, 2013, 33(2): 270-275.

[45] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3544-3556.

[46] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响. 生态学报, 2011, 31(15): 4270-4276.

[47] 许明祥, 王征, 张金, 刘国彬. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应. 生态学报, 2012, 32(17): 5405-5415.