

DOI: 10.5846/stxb202001130105

李传华, 朱同斌, 周敏, 殷欢欢, 王玉涛, 孙皓, 曹红娟, 韩海燕. 河西走廊植被净初级生产力时空变化及其影响因子研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1931-1943.

Li C H, Zhu T B, Zhou M, Yin H H, Wang Y T, Sun H, Cao H J, Han H Y. Temporal and spatial change of Net Primary Productivity of vegetation and its determinants in Hexi Corridor. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1931-1943.

河西走廊植被净初级生产力时空变化及其影响因子研究

李传华*, 朱同斌, 周 敏, 殷欢欢, 王玉涛, 孙 皓, 曹红娟, 韩海燕

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 干旱半干旱区植被 NPP 变化对全球碳循环有重要影响, 该区域 NPP 对气候变化的响应表现出较大的时空异质性, 其驱动机制并不十分清楚。选择中国河西走廊, 利用随机森林算法估算了 2002—2018 年的 NPP, 基于偏导数法计算了气候与人类活动对 NPP 的影响。结果表明: (1) 随机森林算法能较好的适用于干旱半干旱区 NPP 估算。(2) 2002—2018 年间河西走廊年 NPP 的平均值为 $153.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 总量为 37.468 Tg C/a , 呈东南向西北递减的分布特征, 研究期间 NPP 呈 $2.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P=0.09$) 增长趋势。(3) 河西走廊 NPP 变化 52.51% 由气候因子贡献, 47.49% 由人类活动贡献。(4) 在气候变化对 NPP 的影响中, 降水主导了该区 72.21% 的区域, 温度对 NPP 变化量的贡献占 73.71%, 前者影响着 NPP 变化格局, 后者主导 NPP 变化数量。升温 and 增湿均有利于该区 NPP 增加, 随着西北地区气候暖湿化, 河西走廊植被会持续改善, 该研究有助于理解干旱半干旱区 NPP 对气候变化的响应机制, 为适应气候变化政策制定提供理论依据。

关键词: 净初级生产力(NPP); 随机森林; 气候变化; 影响因子; 河西走廊

Temporal and spatial change of Net Primary Productivity of vegetation and its determinants in Hexi Corridor

LI Chuanhua*, ZHU Tongbin, ZHOU Min, YIN Huanhuan, WANG Yutao, SUN Hao, CAO Hongjuan, HAN Haiyan

College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The variation of vegetation Net Primary Productivity (NPP) has an important impact on the global carbon cycle in arid and semi-arid regions. The response of NPP to climate change in this region shows great spatial and temporal heterogeneity, while its driving mechanism is not clear. In this study, the Hexi Corridor in China was selected as study area, and the NPP from 2002 to 2018 was estimated using a random forest algorithm. The effects of climate and human activities on NPP were calculated based on the partial derivative method. The results showed that (1) random forest algorithms presented good performance in the NPP estimation in arid and semi-arid areas. (2) The average annual NPP of Hexi Corridor from 2002 to 2018 was $153.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and the total amount was 37.468 Tg C/a , which indicated a decreasing distribution pattern from southeast to northwest. During the study period, the NPP showed an increasing trend of $2.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P=0.09$). (3) 52.51% of the NPP variation in the Hexi Corridor was contributed by climate factors, and 47.49% was contributed by human activities. (4) For the impact of climate change on the NPP, precipitation dominated 72.21% of the area, and temperature contributed 73.71% of the amount of NPP variation. The former affected the NPP change pattern and the latter dominated the amount of NPP variation. Both warming and humidification are conducive to the increase of NPP in this area. With the warm and humid climate in the Northwest China, the vegetation in the Hexi Corridor will continue to increase. This study is helpful for understanding the response mechanisms of the NPP to climate change in

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761083); 甘肃省自然科学基金(17JR5RA061)

收稿日期: 2020-01-13; 网络出版日期: 2021-01-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lch_nwnu@126.com

arid and semi-arid areas, and provides a theoretical basis for decision making in adaptation to climate change.

Key Words: Net Primary Productivity (NPP); random forest; climate change; impact factors; Hexi Corridor

净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是植物在单位时间和单位面积上,通过光合作用产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,通常以干质量表示^[1]。NPP 是衡量全球与区域生态系统质量的重要指标,也是陆地生态系统碳循环过程的重要参数,准确估算 NPP 是该领域最基础的科学问题之一。气候变暖在持续加剧^[2],对陆地生态系统产生显著影响,人类活动也是影响植被的重要因子^[3],因此,研究 NPP 的时空格局变化及其影响因子对地区可持续发展具有重要意义^[4]。

NPP 估算模型主要有气候模型^[5-6]、过程模型^[7]和参数模型^[8-9]等,国内外学者利用这些模型取得了大量的进展。这些模型各具特点也存在某些不足,例如气候模型估算没有考虑植被信息,不确定性很大;过程模型机制复杂,所需参数多且获得困难;参数模型,比如光能利用率模型的光能传递与转换过程还存在许多的不确定性。因此,继续发展 NPP 的估算是减少不确定性的重要途径。随机森林(Random Forest, RF)机器学习算法近年来在地学领域应用非常广泛^[10-12],在 NPP 估算方面被证明具有较高的可靠性。众多学者利用 RF 方法估算的东亚和美国地区的 NPP 与 MOD17A3 产品相关性 $R^2 > 0.8$ ^[13],估算的中国青藏高原的 NPP 与实测数据相关系数为 0.86^[14-15],估算的欧洲总初级生产力与 MOD17A2 产品数据相关系数为 0.84^[16],因此,随机森林算法具有较广泛的适用性,被认为是一种可靠的 NPP 估算方法。同时,随机森林能够处理高维特征的输入数据,不需要数据降维,对于数据缺省问题也具有较好的容忍度^[17]。

河西走廊是“丝绸之路经济带”的重要通道,是我国向西开放的黄金地段;该区南部是祁连山国家森林公园,北部被沙漠环绕,是我国重要的生态屏障。河西走廊是典型的干旱半干旱区,降水稀少、土壤贫瘠,生态环境十分脆弱,对气候变化和人类活动非常敏感^[3, 18]。随着全球气候变暖,干旱半干旱区变暖趋势更加明显^[19-20],降水的变化具有不确定性^[21],因此其植被变化表现出较强的空间异质性^[22-23]。干旱半干旱区 NPP 变化的驱动因子结论也不一致,有研究表明降水是干旱区植被 NPP 变化的主导因子^[24-25],也有人认为是气温^[26],同时,人类活动的影响也不容忽视。

本研究基于 RF 机器学习模型,利用实测数据和遥感数据估算 2002—2018 年期间的河西走廊 NPP,分析 NPP 时空变化以及气温、降水和人类活动对 NPP 变化的影响。本研究的目有三点,一是评估 RF 机器学习算法估算 NPP 在干旱半干旱区的适用性;二是分析河西走廊 NPP 变化时空格局;三是定量评估该区 NPP 变化的驱动因子,为类似区域的生态保护工作提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

河西走廊地处中国内陆甘肃省境内,位于 37°17'N—42°48'N, 92°12'E—103°48'E,自东向西依次分布石羊河、黑河和疏勒河三大内陆河流域,平均海拔 2166 m。该地是典型温带大陆性气候,通过遥感数据统计,研究期间年均降水为 150.09 mm,年均温为 5.29 °C。该地自南向北由山地、绿洲、荒漠三个子系统构成,对应的子气候类型有高寒气候、温带气候、荒漠气候,主要植被有林地、草地、耕地和荒漠。

1.2 数据处理与方法

1.2.1 NPP 数据

实测 NPP 来自于 2018 年 7—8 月实地采样、文献 NPP^[27-30]和黑河计划数据管理中心(<http://www.heihedata.org/>),共 323 组数据(图 1)。其中,实地采样 19 组草地数据、13 组农田数据和 16 组荒漠灌草数据,地上部分采用齐地面收割法,地下部分连根收集;林地的采集数据为 4 组,通过量取树的胸径(地上 1.3 m 处的直径)估算生物量和相应的 NPP^[31]。

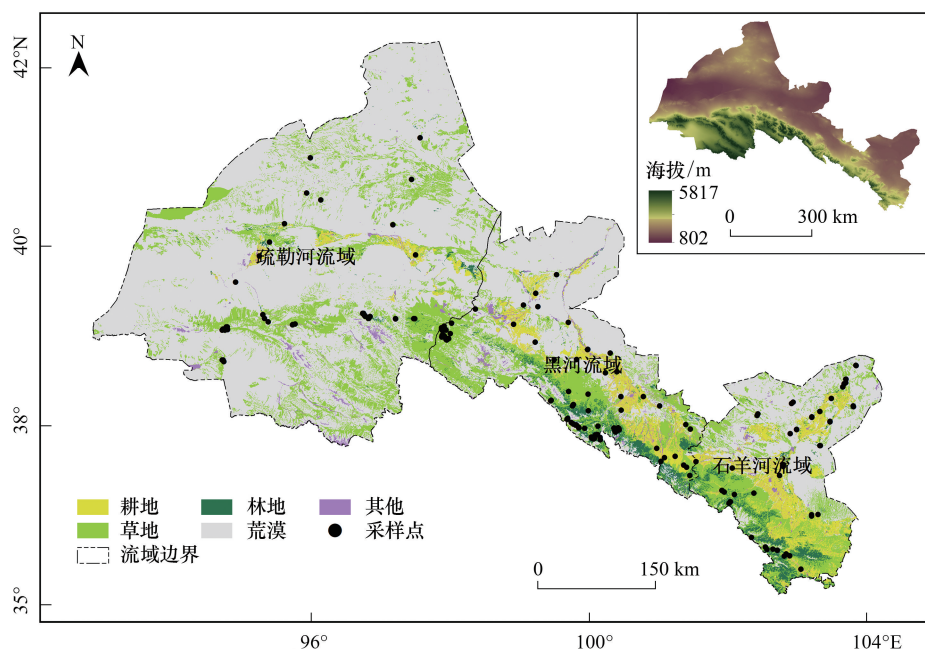


图1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

1.2.2 遥感数据

2001—2018 年温度数据来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 中期再分析产品 (ERA-Interim; <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>), 空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。降水数据来源于 TRMM3B43 数据产品 (<https://earthdata.nasa.gov/>), 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。最后利用双线性插值法重采样为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ ^[32]。NDVI 数据来源于美国国家航空航天局 MOD13Q1 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), 空间分辨率为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 。NPP 产品来源于美国 NASA EOS/MODIS 的 MOD17A3 数据 (http://files.ntsg.umn.edu/data/NTSG_Products/MOD17/), 空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 重采样为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 。

1.2.3 土地利用数据

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率为 100 m , 重采样为 250 m ; 土地利用类型包括 25 个二级类型, 合并为 6 个一级类型, 本文仅研究耕地、林地、草地和荒漠四种类型, 建设用地和水域面积较少忽略不计。

1.2.4 其他数据

DEM 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)。相对湿度通过气温和露点温度计算^[33]; FAPAR 利用 NDVI 计算^[34]; 潜在蒸散利用气温计算^[35]。

1.3 研究方法

1.3.1 随机森林

RF (随机森林算法) 是 Leo Breiman 于 2001 年提出的一个组合分类算法^[36], 是用于分类和回归的机器学习方法, 它是树预测变量的组合, 每棵树都依赖于独立采样的随机向量的值。随机森林通过在给定的训练时间内构建多个决策树并输出作为各个树的类 (分类) 或平均预测 (回归) 的模式来进行运作, 随着树木数量的增加, 随机森林的泛化误差收敛到极限。本研究的 RF 是基于 python 的 scikit-learn 包 (<https://pypi.org/project/scikit-learn/>) 开发的。

本研究 RF 的输入变量包括海拔、坡度、坡向、秋季均温 (上一年)、冬季均温 (上一年)、春季均温、夏季均

温、秋季均温、冬季均温、年平均温、秋季降水(上一年)、冬季降水(上一年)、春季降水、夏季降水、秋季降水、冬季降水、年总降水、平均年相对湿度、年相对湿度(最大)、年相对湿度(最小)、生长季平均相对湿度、生长季总相对湿度、年潜在蒸散、年平均 FAPAR、年最大 FAPAR-年最小 FAPAR、年最大 FAPAR、年最小 FAPAR、生长季平均 FAPAR、生长季总 FAPAR,共 32 个,NPP 为输出变量。利用随机抽取 80% 的 NPP 数据用于训练,剩下 20% 用于验证,利用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE),通过参数调优选择最佳模型。

1.3.2 NPP 年际变化率的计算

本研究利用最小二乘法分析 2002—2018 年河西走廊 NPP 的时空变化,公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NPP}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (1)$$

式中 slope 为 NPP 的年际变化率, NPP_i 为第 i 年的 NPP。变化趋势的显著性检验采用 F 检验,公式如下:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

式中, $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 称为误差平方和, $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 称为回归平方和, y_i 为第 i 年的 NPP 实际观测值, $\hat{y}_i$ 为其回归值, $\bar{y}$ 为多年 NPP 平均值, n 为年数。

1.3.3 NPP 与气候因子的相关性

首先计算相关系数,然后计算偏相关系数。相关系数计算公式如下:

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

式中, R_{xy} 为 x 、 y 两变量的相关系数, x_i 为第 i 年的 NPP, y_i 为第 i 年的气温或降水, $\bar{x}$ 为多年平均 NPP, $\bar{y}$ 为多年气温或降水的平均值, n 为年数。

控制降水(或气温)的 NPP 与气温(或降水)的偏相关系数计算公式如下:

$$r_{ijm} = \frac{r_{ij} - r_{im}r_{jm}}{\sqrt{(1 - r_{im}^2) + (1 - r_{jm}^2)}} \quad (4)$$

式中, r_{ijm} 为将变量 m 固定后变量 i 和变量 j 之间的偏相关系数, r_{ij} 、 r_{jm} 、 r_{im} 分别为变量 i 和 j 、变量 j 和 m 、变量 i 和 m 的相关系数。

1.3.4 驱动因子对 NPP 变化的影响

利用式(5)探测温度和降水对 NPP 变化的贡献,该公式于 1974 年被 McCuen 应用于水文动态学中^[37],目前被应用于驱动因子对 NPP 的贡献中,被证明是一个比较可行的方法^[38-39]。

$$\begin{aligned} \text{slope} &= C(\text{tem}) + C(\text{pre}) + UF \\ &= (\partial \text{NPP} / \partial \text{tem}) \times (\partial \text{tem} / \partial n) + (\partial \text{NPP} / \partial \text{pre}) \times (\partial \text{pre} / \partial n) + UF \end{aligned} \quad (5)$$

式中 slope 为 NPP 的年际变化率, $C(\text{tem})$ 和 $C(\text{pre})$ 分别是年均温和年降水对 NPP 年际变化的贡献,其中 $C(\text{tem}) = (\partial \text{NPP} / \partial \text{tem}) \times (\partial \text{tem} / \partial n)$, $\partial \text{NPP} / \partial \text{tem}$ 是 NPP 和 tem 之间线性回归的斜率, $\partial \text{tem} / \partial n$ 是 tem 和 n 线性回归的斜率, n 为年数, $C(\text{pre})$ 计算方法同上。 UF 是气候因子对 NPP 年际变化贡献的残差,代表人类活动、火灾、病虫害等其他因子,人类活动占其中的主体,因此本文在描述时把其当作人类活动的贡献^[40]。

2 结果

2.1 模型验证

RF 模拟了 2002—2018 年的 NPP,图 2 为实测数据与模拟 NPP 的对比结果, R^2 为 0.75 ($P < 0.01$),说明

NPP 的模拟精度较好。

2.2 河西走廊 NPP 的时空分布特征

2002—2018 年河西走廊年均 NPP 空间分布如图 3 所示,平均值为 $153.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,总量为 37.468 Tg C/a ,呈从东向西和从南向北递减的分布特征。NPP 的高值区域主要位于祁连山区和绿洲区,平均值分别为 $242.18 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $213.87 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,低值区域位于荒漠区,平均值为 $91.43 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

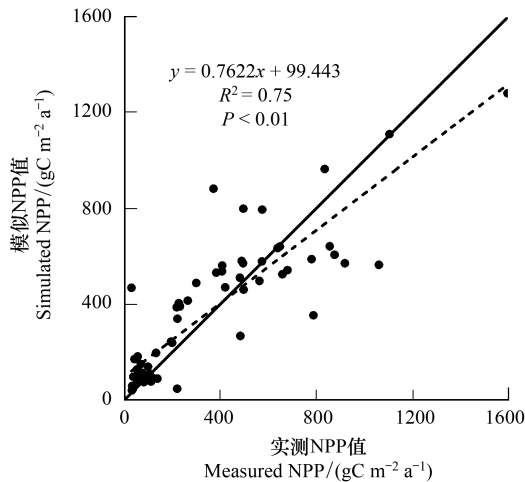


图 2 实测 NPP 与模拟 NPP 的比较

Fig. 2 Comparison of measured NPP and simulated NPP

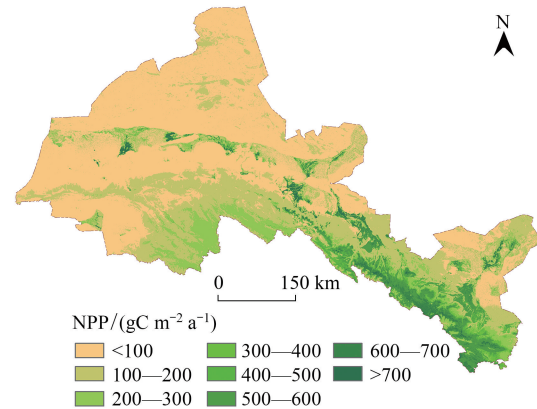


图 3 2002—2018 年河西走廊多年平均 NPP 空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of multi-year mean NPP in Hexi Corridor from 2002 to 2018

2002—2018 年河西走廊植被 NPP 年际波动较大,位于 $122.64\text{--}223.07 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间(图 4)。2007 和 2018 年高出多年平均 40.70% 和 45.50% ;2006 年低于多年平均 20.01% 。研究期间整体呈增加趋势,增长率为 $2.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($R^2=0.13$, $P=0.09$)。不同植被类型的 NPP 差异较大,耕地、林地、草地、荒漠的 NPP 均值分别为 $439.51 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $489.28 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $200.70 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $91.43 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,总量分别为 6.993 Tg C/a 、 3.596 Tg C/a 、 10.670 Tg C/a 、 15.257 Tg C/a 。

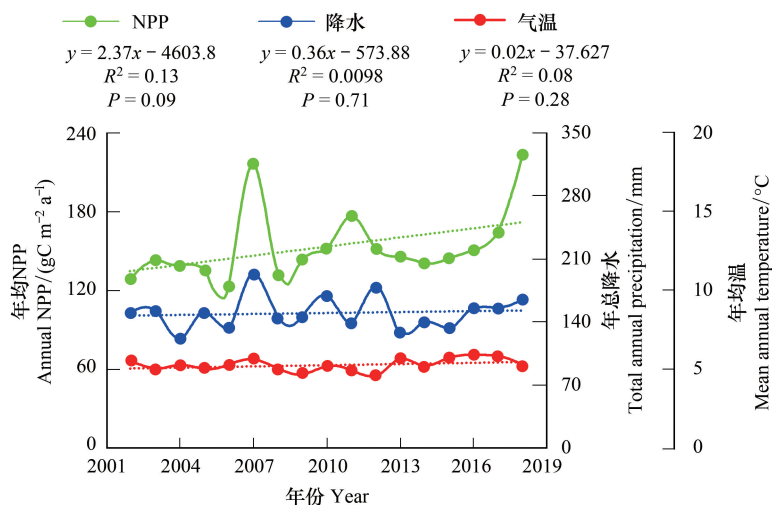


图 4 2002—2018 年河西走廊 NPP、年均温和年降水的年际变化

Fig. 4 Inter-annual variations of NPP, annual average temperature and annual precipitation in Hexi Corridor from 2002 to 2018

2002—2018 年间河西走廊植被 NPP 变化趋势见图 5, 呈增加趋势的面积占 80.39%, 主要分布在河西走廊北部和祁连山区; 减少趋势的占 19.61%, 主要分布在走廊西南部和中部; 呈显著增加和极显著增加趋势的面积分别占 6.33% 和 3.99%, 主要分布在走廊绿洲区和祁连山区; 呈显著减少和极显著减少趋势的面积分别占 0.22% 和 0.11%, 零星分布在嘉峪关、肃州区、凉州区和民勤等地。总体来看, 研究期间河西走廊 NPP 呈现增加趋势。

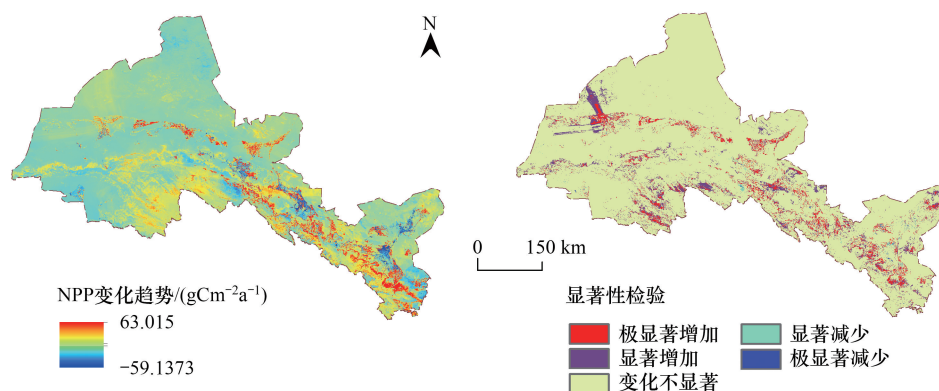


图 5 2002—2018 河西走廊植被 NPP 年际变化显著性检验

Fig. 5 Significant test of the inter-annual variation of NPP in the Hexi Corridor from 2002 to 2018

2.3 NPP 与气候因子的相关性

2002—2018 年 NPP 与年降水和年均温相关性见图 6, NPP 与气温呈正相关和负相关各占 53.31% 和 46.69%, 呈正相关的区域主要位于走廊中部及西南部, 呈负相关的区域主要在荒漠区。NPP 与降水 88.58% 的区域呈正相关; 呈负相关的区域仅占 11.42%, 主要分布在祁连山区。

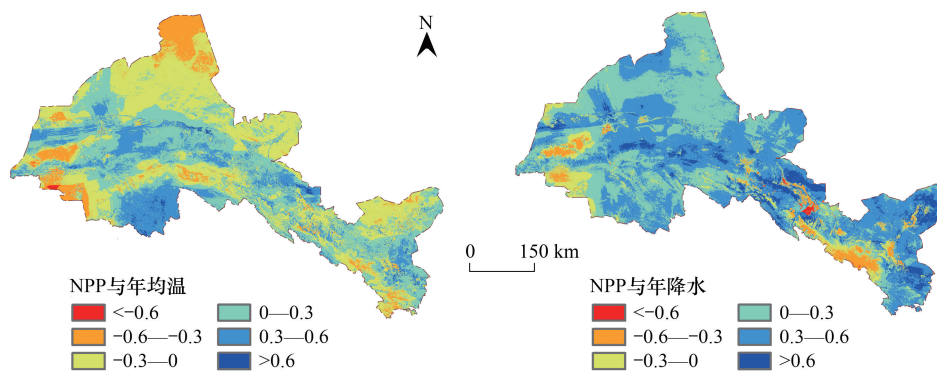


图 6 2002—2018 年年均温和年降水与 NPP 的相关系数

Fig. 6 The Correlation coefficients of annual average temperature and annual precipitation with NPP from 2002 to 2018

2.4 气候与人类活动对 NPP 变化的影响

相关系数仅能表征 NPP 与各气候因子之间的相关程度, 不能量化各因子对 NPP 变化的影响, 图 7、8 是根据公式(5)计算的气温、降水以及人类活动对 NPP 变化的贡献。2002—2018 年 NPP 平均增长率为 0.478 Tg C/a, 其中 0.251 Tg C/a 由气候决定, 0.227 Tg C/a 由人类活动决定(图 7)。其中, 气候对 NPP 变化正贡献和负贡献的面积分别为 80.17% 和 19.83%, 正贡献在石羊河流域、黑河中下游和疏勒河中下游地区, 负贡献主要在祁连山区。人类活动对 NPP 变化正贡献和负贡献的面积分别为 50.52% 和 49.48%, 正贡献主要在祁连山区和石羊河下游荒漠地带。

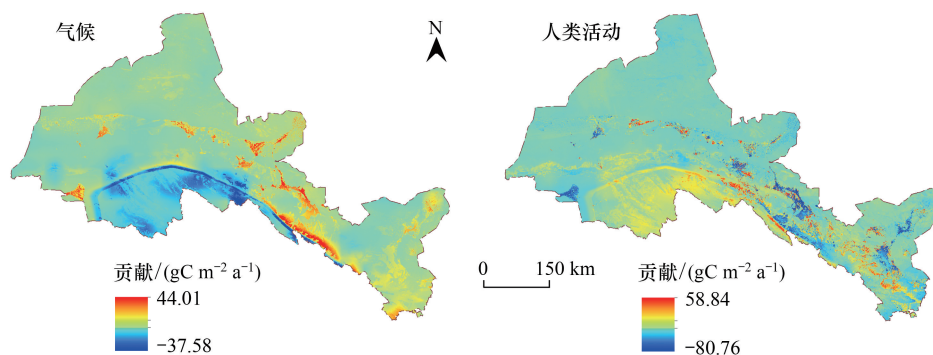


图7 气候变化和人类活动对 NPP 变化的贡献

Fig. 7 Contributions of climate change and human activities to changes in NPP

2.5 气候因子对 NPP 变化的影响

气温和降水对 NPP 变化的贡献如图 8 所示,研究期间气温、降水均对 NPP 起促进作用,前者对 NPP 的正贡献的面积占 85.85%,主要分布在石羊河流域、黑河中下游和疏勒河中下游地区;后者的正贡献占 68.11%,主要分布在石羊河流域绿洲区和沙漠区、黑河中下游和疏勒河中下游地区。气温和降水对 NPP 年际变化的贡献分别为 0.185 Tg C/a 和 0.066 Tg C/a,分别占 73.71% 和 26.29%,气温主导着 NPP 的数量变化。从影响面积来看,气温和降水分别主导的区域各占 27.79% 和 72.21%,降水对 NPP 变化的格局起主导作用。

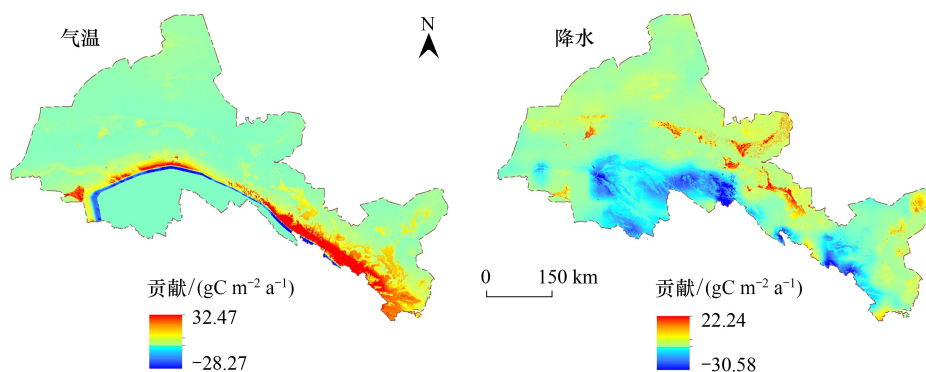


图8 气候因子对 NPP 变化的贡献

Fig. 8 Contribution of climate factors to changes in NPP

为了进一步明确 NPP 变化的驱动机制,将 NPP 与气候因子的相关性和贡献联系起来进行分析(表 1),可以看出,降水增加使 NPP 增加即 NPP_P(++) 占整个区域面积最大,为 61.46%,主要在石羊河以东和河西走廊北部;气温升高使 NPP 增加即 NPP_T(++) 占整个区域的 52.61%,主要在河西走廊中部和南部、石羊河以东区域。

3 讨论

3.1 NPP 值及其变化

图 2 说明了基于随机森林算法的 NPP 估算值是可靠的,与前人的研究结果较为一致,见表 2。同时,也与 MODIS NPP 遥感产品(MOD17A3)(图 9)进行了比较(空白区是无值区),相关性为 0.782, RMSE 为 190.96 gC m⁻² a⁻¹,说明两者吻合较好。在走廊南部草地区域吻合较好,祁连山区和绿洲区较差,其原因有两点,一是 MOD12Q1 产品是 MOD17A3 NPP 的输入数据,该产品在同质区域准确性较好^[41],祁连山区地貌破碎,阴坡阳

坡分布的植被差异很大,绿洲区由于人类的影响景观破碎度很高,比较而言草地的均质性较高;其次,本研究用于模型训练的不同植被类型的 NPP 数据的数量比例相差较大,实测草地 NPP 较多,这也是原因之一。

表 1 NPP 对气候因子响应的组合
Table 1 Combinations of the responses of NPP to climate factors

组合类型 Combination type	NPP 与气候因子 NPP and climatic factors	偏相关分析 Partial correlation analysis	气候因子对 NPP 贡献 Contribution of climatic factors to NPP	意义 Meaning	面积占比 Area proportion/%
NPP_T(++)	NPP 和气温	正相关	正贡献	气温升高使 NPP 增加	52.61%
NPP_T(+-)	NPP 和气温	正相关	负贡献	气温降低使 NPP 减少	0.71%
NPP_T(-+)	NPP 和气温	负相关	正贡献	气温降低使 NPP 增加	45.62%
NPP_T(--)	NPP 和气温	负相关	负贡献	气温升高使 NPP 减少	1.06%
NPP_P(++)	NPP 和降水	正相关	正贡献	降水升高使 NPP 增加	61.46%
NPP_P(+-)	NPP 和降水	正相关	负贡献	降水降低使 NPP 减少	27.11%
NPP_P(-+)	NPP 和降水	负相关	正贡献	降水降低使 NPP 增加	6.68%
NPP_P(--)	NPP 和降水	负相关	负贡献	降水升高使 NPP 减少	4.75%

表中括号第一个“+”或“-”代表正相关或负相关,第二个“+”或“-”代表正贡献或负贡献

表 2 估算 NPP 与文献结果比较
Table 2 Estimated NPP compared with literature results

模型 Model	多年平均 NPP Multi-year mean NPP/(gC m ⁻² a ⁻¹)	研究区 Study area	时间 Time
CASA ^[42]	151.51	河西走廊	2015
CASA ^[26]	241.13	甘肃省	2000—2010
C- FIX ^[43]	168.47	中国西部	2002
3-PCS ^[44]	315.99	中国	2003—2007
BETHY/DLR ^[45]	121.78	哈萨克斯坦中部	2010—2011
本研究 This study	153.32	河西走廊	2002—2018

本研究 NPP 总体呈上升趋势($2.37\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, $P=0.09$),与 2000—2013 年中亚的草地 NPP 呈上升趋势一致^[46],与潘竞虎等研究发现疏勒河流域 NPP 增加趋势结论一致^[47]。研究区 19.61% 的区域 NPP 减少,这主要是气候变化造成的,如图 10,可以看出,气温升高、降水减少,加剧了水分胁迫,导致 NPP 减少。

3.2 气候与人类活动对 NPP 的影响

研究期间河西走廊植被 NPP 平均增长率为 0.478 Tg C/a ($P=0.09$),气候变化和人类活动分别贡献 52.51% 和 47.49%,两者共同主导 NPP 变化,与本研究组前期在石羊河流域的研究结论相符^[48]。很多研究也发现气候变化和人类活动对生态环境脆弱区的植被影响基本相当,例如 Zheng 等发现气候变化对黄土高原植被的影响贡献 57.65%,人类活动贡献 42.35%^[3];周妍妍等发现气候变化对疏勒河流域植被恢复贡献占 55%,减少占 45%^[49],Chen 等发现 2001—2011 年气候变化和人类活动对青藏高原 NPP 变化影响的面积分别为 56.59% 和 42.98%^[50]。

气候对 NPP 变化正贡献的面积为 80.17%,这是河西走廊气候朝暖湿方向变化的结果,这与杨雪梅等发现河西地区气温和降水皆呈上升趋势,植被呈显著改善状态^[51]结论一致。很多研究结果表明西北内陆河流

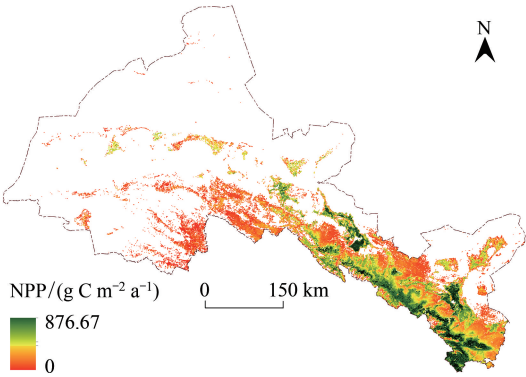


图 9 MODIS NPP 空间分布
Fig. 9 The spatial distribution of MODIS NPP

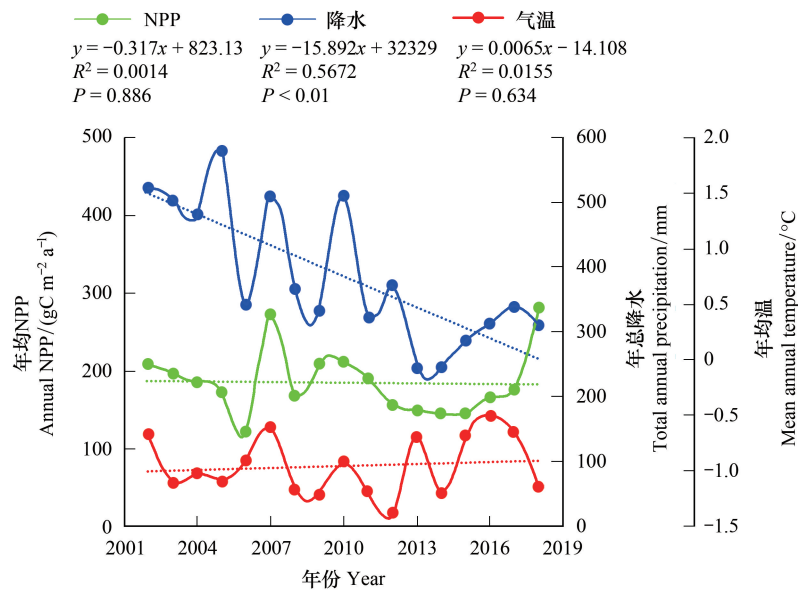


图 10 NPP 呈减少趋势区域的年均温和年降水变化

Fig. 10 Changes of temperature and precipitation in NPP decreasing trend region

域气候趋向暖湿化,如 1981—2015 年期间石羊河流域气温和降水均呈增加趋势^[52];虽然本研究期间河西走廊的气温和降水增长趋势并不显著,但在正贡献区域的气候是显著的暖湿化,见图 11,缓解了水分胁迫和低温胁迫对植被生长的限制^[53]。

人类活动对河西走廊植被生产力呈积极影响,主要分布在祁连山区、绿洲区和石羊河下游荒漠地带^[54]。其原因主要有,人类活动对祁连山区呈正贡献主要与政府实施封山育林育草、草场的轮牧与休牧政策有关,大量研究表明国家生态保护政策有利于植被恢复和生长^[55-57];绿洲区呈正影响主要是人类对耕地的灌溉、施肥等管理措施导致的^[58-59];下游荒漠区的正向作用主要是流域治理工程的成效,如黑河流域生态调水工程、石羊河流域环境治理工程等通过跨流域调水保证了下游荒漠区的生态用水,植被得以恢复^[60-63]。这与 Zhou 等人发现人类活动导致中国西北地区 NPP 增长^[64], Gang 等人指出人类活动导致非洲、南美和欧洲的 NPP 显著增长^[65]等结论一致。呈显著负向影响区域主要分布在疏勒河流域北部和西部,主要原因是由于该区域过度放牧导致植被退化,这与周妍妍等发现人类活动对疏勒河流域植被的负向影响比较普遍的结论一致^{[49][47]}。

3.3 气温和降水对 NPP 的贡献度

气温和降水对 NPP 的影响在数值和面积上的主导地位并不一致,这个现象是由河西走廊复杂的气候类型和植被类型决定的。降水主导 NPP 变化的面积占河西走廊的 72.21% (图 12),这是因为干旱半干旱地区植被对降水量的变化更加敏感,降水增加(0.21 mm/a, $P=0.587$)改善了植被生长的气候条件,与 Scanlon 等和 Rodríguez-Iturbe 等得出降水是塑造干旱半干旱生态系统植被组成和分布的主要驱动力的结论一致^[66-67]。气温主导 NPP 数量变化,区域主要在河西走廊高寒气候区,该区研究期间增温明显(0.03 °C/a, $P=0.175$),

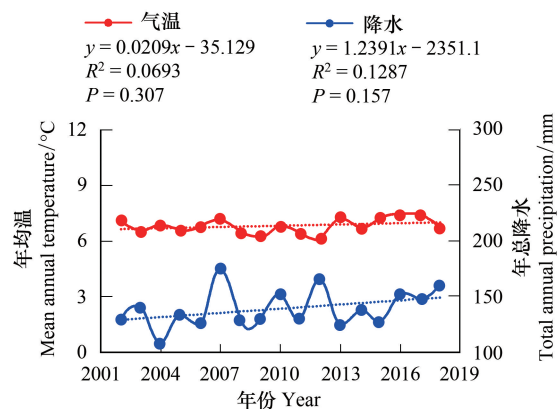


图 11 气候对 NPP 变化正贡献区域的年气温和降水变化

Fig. 11 Changes of temperature and precipitation in regions where climate contributes positively to changes in NPP

NPP 增长趋势较大 ($3.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $P=0.074$)。河西走廊高寒气候区年均气温较低 (年均 $0.37 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 降水比较充沛 (年均 448.25 mm), 低温是植物生长的主要胁迫因子, 主要分布森林和高寒草甸, NPP 占全域 NPP 总量的比重较大, 因此, 温度在 NPP 变化量的贡献中占主导地位。对于干旱半干旱区, 很多研究表明降水主导 NPP 的变化, 如 Xu 等发现降水是控制中国北方干旱地区 NPP 变化的主要因素^[68], Henrik 等指出蒙古南部荒漠草原 NPP 变化的 66% 是由降水引起的^[69]。其结论与本研究不一致的原因主要是和研究对象有关, 比如 Henrik 研究的荒漠草原, 其主控因子肯定是降水。

温度对河西走廊 NPP 的影响是一个多重的角色, 温度升高导致 NPP 增加和温度降低导致 NPP 增加的区域分别占 52.61% 和 45.62%。前者主要分布在祁连山区高寒气候带, 后者主要分布在荒漠区。在荒漠区, 温度降低可以减少蒸散发, 减缓水分胁迫^[70]; 同时荒漠区还存在高温胁迫, 降温可以增加光合利用率^[71], 有利于生物量累积。降水与 NPP 呈正相关的面积占全区的 88.58%, 呈负相关的仅占 11.42%。前者面积比例大是因为荒漠气候区占全区的 73.44%, 该区的植被以典型草地和荒漠植被为主, 水分是植物的主要胁迫因子, 降水主导着 NPP 的变化^[72]。与降水呈负相关的主要分布在流域上游的高寒气候带, 该区降水充沛, 降水增加意味着晴天时间减少, 植被光合作用时间减少, 不利于植物生长^[73]。

4 结论

本研究利用 RF 模型结合实测数据、地形、气象和植被特征数据, 对 2002—2018 年河西走廊 NPP 进行估算, 并分析了驱动因子对 NPP 影响, 结论如下:

利用 RF 可以可靠的估算干旱半干旱区 NPP, 与传统的估算方法精度相当, 具有算法简单、训练速度快和泛化能力强等优点。在人类活动和气候变化的共同作用下, 2002—2018 年河西走廊 NPP 呈 0.478 Tg C/a 的增长趋势, 两者的贡献基本相当。只考虑气候的作用, 就贡献值而言, 温度对全区 NPP 变化值的贡献占 73.71%, 降水占 26.29%; 就影响面积而言, 72.21% 的区域 NPP 变化由降水主导, 27.79% 由温度主导; 就相关性而言, 降水与 NPP 呈显著的正相关, 温度与 NPP 的相关性受气候类型影响。

总体来看, 温度主导着 NPP 变化的数量, 降水控制着该区 NPP 变化格局, 增温和增湿均有利于该区植被生长, 随着中国西北干旱区气候的暖湿化, 河西走廊未来的植被将会进一步改善。

参考文献 (References):

- [1] Goudriaan J. Global carbon cycle and carbon sequestration//Beran M A, ed. Carbon Sequestration in the Biosphere. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995: 3-18.
- [2] Al-Ghussain L. Global warming: review on driving forces and mitigation. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019, 38(1): 13-21.
- [3] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, Cheng H, Zhang X L, Huang F Q, Li F M, Ye J S. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2019, 660: 236-244.
- [4] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: implications for the kyoto protocol. Science, 1998, 280 (5368): 1393-1394.
- [5] Ricotta C, Avena G, De Palma A. Mapping and monitoring net primary productivity with AVHRR NDVI time-series: statistical equivalence of cumulative vegetation indices. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(5-6): 325-331.
- [6] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40

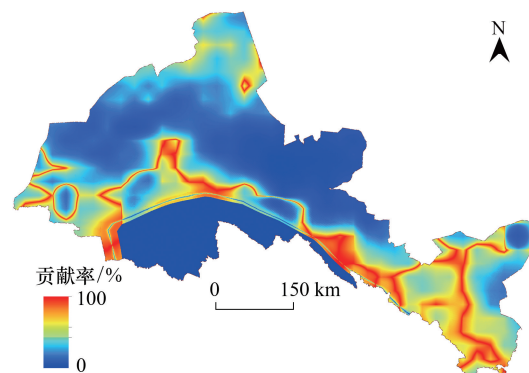


图 12 气温在气候贡献中的贡献率

Fig. 12 The contribution of temperature in climate contribution
降水的贡献率为 1 减去气温贡献率

- (4): 343-352.
- [7] Liu J, Chen J M, Cihlar J, Park W M. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(2): 158-175.
- [8] Saki M, Soltani S, Esfahani M T, Jafari R. Evaluating the variability of ANPP in central Iranian arid and semi-arid rangelands using CASA model and its relationship with climatic factors. *Geosciences Journal*, 2019, 23(3): 531-545.
- [9] Piao S L, Fang J Y, He J S. Variations in vegetation net primary production in the Qinghai-Xizang Plateau, China, from 1982 to 1999. *Climatic Change*, 2006, 74(1-3): 253-267.
- [10] Ozigis M S, Kaduk J D, Jarvis C H, da Conceição Bispo P, Balzter H. Detection of oil pollution impacts on vegetation using multifrequency SAR, multispectral images with fuzzy forest and random forest methods. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113360.
- [11] Baez-Villanueva O M, Zambrano-Bigiarini M, Beck H E, McNamara I, Ribbe L, Nauditt A, Birkel C, Verbist K, Giraldo-Osorio J D, Thinh N X. RF-MEP: a novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111606.
- [12] Hou N, Zhang X T, Zhang W Y, Wei Y, Jia K, Yao Y J, Jiang B, Cheng J. Estimation of surface downward shortwave radiation over china from himawari-8 AHI data based on random forest. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 181.
- [13] Yu B, Chen F, Chen H Y. NPP estimation using random forest and impact feature variable importance analysis. *Journal of Spatial Science*, 2019, 64(1): 173-192.
- [14] Zeng N, Ren X L, He H L, Zhang L, Zhao D, Ge R, Li P, Niu Z G. Estimating grassland aboveground biomass on the Tibetan Plateau using a random forest algorithm. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 479-487.
- [15] 李传华, 孙皓, 王玉涛, 曹红娟, 殷欢欢, 周敏, 朱同斌. 基于机器学习估算青藏高原多年冻土区草地净初级生产力. *生态学杂志*, 2020, 39(5): 1734-1744.
- [16] Tramontana G, Ichii K, Camps-Valls G, Tomelleri E, Papale D. Uncertainty analysis of gross primary production upscaling using Random Forests, remote sensing and eddy covariance data. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 360-373.
- [17] Mutanga O, Adam E, Cho M A. High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18: 399-406.
- [18] Guan Q Y, Yang L Q, Guan W Q, Wang F F, Liu Z Y, Xu C Q. Assessing vegetation response to climatic variations and human activities: spatiotemporal NDVI variations in the Hexi Corridor and surrounding areas from 2000 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 135(3-4): 1179-1193.
- [19] Huang J P, Guan X D, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(2): 5391-5398.
- [20] Modarres R, da Silva V P R. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of arid environments*, 2007, 70(2): 344-355.
- [21] Sivakumar M V K, Das H P, Brunini O. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Climatic Change*, 2005, 70(1): 31-72.
- [22] Propastin P A, Kappas M, Muratova N R. Inter-annual changes in vegetation activities and their relationship to temperature and precipitation in central asia from 1982 to 2003. *Journal of Environmental Informatics*, 2008, 12(2), doi: 10.3808/jei.200800126.
- [23] Zhao F B, Wu Y P, Sivakumar B, Long A H, Qiu L J, Chen J, Wang L J, Liu S G, Hu H C. Climatic and hydrologic controls on net primary production in a semiarid loess watershed. *Journal of hydrology*, 2019, 568: 803-815.
- [24] Guo Q, Hu Z M, Li S G, Li X R, Sun X M, Yu G R. Spatial variations in aboveground net primary productivity along a climate gradient in Eurasian temperate grassland: effects of mean annual precipitation and its seasonal distribution. *Global Change Biology*, 2012, 18(12): 3624-3631.
- [25] Gang C C, Zhou W, Li J L, Chen Y Z, Mu S J, Ren J Z, Chen J M, Groisman P Y. Assessing the spatiotemporal variation in distribution, extent and NPP of terrestrial ecosystems in response to climate change from 1911 to 2000. *PLoS One*, 2013, 8(11): e80394.
- [26] Liu C Y, Dong X F, Liu Y Y. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China. *CATENA*, 2015, 125: 190-199.
- [27] Xia J Z, Ma M N, Liang T G, Wu C Y, Yang Y H, Zhang L, Zhang Y J, Yuan W P. Estimates of grassland biomass and turnover time on the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(1): 014020.
- [28] 杜自强, 王建, 沈宇丹. 山丹县草地地上生物量遥感估算模型. *遥感技术与应用*, 2006, 21(4): 338-343.
- [29] 冯琦胜, 高新华, 黄晓东, 于惠, 梁天刚. 2001—2010 年青藏高原草地生长状况遥感动态监测. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(4): 75-81.
- [30] Wang P J, Xie D H, Zhou Y Y, E Y H, Zhu Q J. Estimation of net primary productivity using a process-based model in Gansu Province,

- Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(2): 647-658.
- [31] 王金叶, 车克钧, 傅辉恩, 常学向, 宋采福, 贺红元. 祁连山水源涵养林生物量的研究. *福建林学院学报*, 1998, 18(4): 319-323.
- [32] Fang J, Du J, Xu W, Shi P J, Li M, Ming X D. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on the orographical effect and meteorological conditions in a mountainous area. *Advances in Water Resources*, 2013, 61: 42-50.
- [33] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [34] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [35] 张新时, 杨奠安, 倪文革. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(三)几种主要方法与 PEP 程序介绍. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(2): 97-109.
- [36] Breiman L. Random forests. *Machine learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [37] McCuen R H. A sensitivity and error analysis CF procedures used for estimating evaporation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1974, 10(3): 486-497.
- [38] Meng D J, Mo X G. Assessing the effect of climate change on mean annual runoff in the Songhua River basin, China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(7): 1050-1061.
- [39] Yang H B, Yang D W. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001. *Journal of Hydrology*, 2012, 414-415: 184-193.
- [40] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, Chen Y Z, Gang C C, An R, Li J L. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012. *Science of the Total Environment*, 2016, 563-564: 210-220.
- [41] Gulbeyaz O, Bond-Lamberty B, Akyurek Z, West T O. A new approach to evaluate the MODIS annual NPP product (MOD17A3) using forest field data from Turkey. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(8): 2560-2578.
- [42] 李传华, 曹红娟, 范也平, 韩海燕, 孙皓, 王玉涛. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例. *生态学报*, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [43] 卢玲, 李新, Veroustraete F. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. *生态学报*, 2005, 25(5): 1026-1032.
- [44] 刘建锋, 肖文发, 郭明春, 吴焕萍, 江泽平. 基于 3-PGS 模型的中国陆地植被 NPP 格局. *林业科学*, 2011, 47(5): 16-22.
- [45] Eissfelder C, Kuenzer C, Dech S, Buchroithner M F. Comparison of two remote sensing based models for regional net primary productivity estimation—A case study in semi-arid central kazakhstan. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(4): 1843-1856.
- [46] Yang Y, Wang Z Q, Li J L, Gang C C, Zhang Y Z, Zhang Y, Odeh I, Qi J G. Comparative assessment of grassland degradation dynamics in response to climate variation and human activities in China, Mongolia, Pakistan and Uzbekistan from 2000 to 2013. *Journal of Arid Environments*, 2016, 135: 164-172.
- [47] 潘竟虎, 黄克军, 李真. 2001-2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [48] 李传华, 赵军, 师银芳, 魏伟. 基于 NPP 的石羊河流域环境治理工程成效评价. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1208-1216.
- [49] 周妍妍, 朱敏翔, 郭晓娟, 李凯, 苗俊霞, 郭建军, 徐晓峰, 岳东霞. 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. *生态学报*, 2019, 39(14): 5127-5137.
- [50] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, Wu J S, Wang J S, Shi P L, Zhang Y J, Yu C Q. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189-190: 11-18.
- [51] 杨雪梅. 气候变暖背景下河西地区荒漠植被变化研究(1982-2013)[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [52] 张雪蕾, 王义成, 肖伟华, 杨瑞祥, 王燕, 朱丽珊. 石羊河流域 NPP 对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 3110-3118.
- [53] 胡光成, 金晓媚, 万力, 蔡晓雨. 祁连山区植被生长与水热组合关系研究. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(2): 17-20.
- [54] 李传华, 范也平, 曹红娟, 韩海燕. 基于 CASA 模型的植被第一性生产力人为影响定量研究——以石羊河流域为例. *干旱区地理*, 2018, 41(1): 142-151.
- [55] 王姝, 张艳芳, 位贺杰, 张宏运. 生态恢复背景下陕甘宁地区 NPP 变化及其固碳释氧价值. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1421-1428.
- [56] 王子婷, 李广, 蔡国军, 柴春山, 张洋东, 戚建莉. 陇中黄土丘陵区农户收入对退耕还林(草)政策的响应——以龙滩小流域为例. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 223-232.
- [57] 杨阳. 黄土高原典型小流域植被与土壤恢复特征及生态系统服务功能评估[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [58] Liang W, Yang Y T, Fan D M, Guan H D, Zhang T, Long D, Zhou Y, Bai D. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 22-36.
- [59] Liang W, Lü Y H, Zhang W B, Li S, Jin Z, Ciais P, Fu B J, Wang S, Yan J W, Li J Y, Su H M. Grassland gross carbon dioxide uptake based

- on an improved model tree ensemble approach considering human interventions; global estimation and covariation with climate. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2720-2742.
- [60] Li Y H, Squires V R. Integrated water resources management of inland river basins in the Hexi Corridor, Gansu, China with special reference to the Shule River Basin//Squires V R, Milner H M, Daniell K A, eds. *River Basin Management in the Twenty-First Century: Understanding People and Place*. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [61] Cheng G D, Li X, Zhao W Z, Xu Z M, Feng Q, Xiao S C, Xiao H L. Integrated study of the water-ecosystem-economy in the Heihe River Basin. *National Science Review*, 2014, 1(3): 413-428.
- [62] 李传华, 赵军. 2000-2010 年石羊河流域 NPP 时空变化及驱动因子. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 712-718.
- [63] 孙力炜, 张勃, 侯春梅, 迟秀丽, 贺郝钰. 祁连山区植被净初级生产力的空间变化特征分析. *遥感技术与应用*, 2015, 30(3): 592-598.
- [64] Zhou W, Gang C C, Zhou F C, Li J L, Dong X G, Zhao C Z. Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 560-569.
- [65] Gang C C, Zhou W, Chen Y Z, Wang Z Q, Sun Z G, Li J L, Qi J G, Odeh I. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4273-4282.
- [66] Scanlon T M, Albertson J D, Caylor K K, Williams C A. Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savanna ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2-3): 376-388.
- [67] Rodríguez-Iturbe I, D'Odorico P, Porporato A, Ridolfi L. Tree-grass coexistence in Savannas: the role of spatial dynamics and climate fluctuations. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(2): 247-250.
- [68] Xu H J, Wang X P. Effects of altered precipitation regimes on plant productivity in the arid region of northern China. *Ecological Informatics*, 2016, 31: 137-146.
- [69] von Wehrden H, Wesche K. Relationships between climate, productivity and vegetation in southern Mongolian drylands. *Basic and Applied Dryland Research*, 2007, 1(2): 100.
- [70] Simoes M, Baruch Z. Responses to simulated herbivory and water stress in two tropical C₄ grasses. *Oecologia*, 1991, 88(2): 173-180.
- [71] 刘琴, 孙辉, 何道文. 干旱和高温对植物胁迫效应的研究进展. *西华师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 26(4): 364-368.
- [72] Pan J H, Dong L L. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule River basin from 2001 to 2010. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2018, 24(3): 797-818.
- [73] 杨玲莉. 2000—2014 年黄河源区植被 NDVI 时空变化特征与气候变化响应分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.