

DOI: 10.5846/stxb201802060319

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): - .
Li C H, Cao H J, Fan Y P, Han H Y, Sun H, Wang Y T. Estimation by remote sensing and analysis of net primary productivity (NPP) based on corrected CASA model: A case study of Hexi Corridor. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析 ——以河西走廊为例

李传华*, 曹红娟, 范也平, 韩海燕, 孙皓, 王玉涛

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 利用 CASA 模型估算植被净初级生产力(NPP)应用广泛,但其精度仍然有待提高。基于地理因子回归方法(AMRR)和地表水分指数(LSWI)对 CASA 模型的两个关键参数:温度胁迫系数和水分胁迫系数进行校正,再估算 NPP 并分析了校正对植被 NPP 及各因子与 NPP 关系的影响。研究表明:(1)校正能有效提高 CASA 模型的估算精度,校正后 NPP 总量为 34.29 TgC/a,原 CASA 模型高估了 0.23 TgC/a。(2)本研究不仅可以校正地形对 NPP 的影响,还可以校正平坦地形下人类活动区 NPP 的影响;在高海拔、地形起伏较大的区域以及人类活动地区,校正对 NPP 估算影响较大,绿洲区原模型存在高估。(3)校正对生长季的影响大于非生长季;坡度对 NPP 影响较大,坡度越大原模型高估越多;校正前高估了阳坡 NPP,低估了阴坡 NPP。

关键词: 净初级生产力;CASA 模型;温度胁迫校正;水分胁迫校正;河西走廊

Estimation by remote sensing and analysis of net primary productivity (NPP) based on corrected CASA model: A case study of Hexi Corridor

LI Chuanhua*, CAO Hongjuan, FAN Yeping, HAN Haiyan, SUN Hao, WANG Yutao

College of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The CASA model is widely used in estimating vegetation net primary productivity (NPP), but its accuracy needs to be improved. Based on the geographical factor regression method (AMRR) and land surface water index (LSWI), this study aimed to correct the temperature stress coefficient and water stress coefficient, two key parameters of CASA model. Next, we continued to estimate NPP and analyze the effect of the correction on vegetation and on the relationship between NPP and other factors. Results showed that: (1) The correction could effectively improve the estimation accuracy of the CASA model. The amount of corrected NPP was 34.29 TgC/a, but the original NPP was 34.52 TgC/a; therefore, the NPP of the original model was overestimated by 0.23 TgC/a. (2) This method can not only correct the influence of terrain on NPP, but also corrects the impact of human activities areas on NPP under flat terrain. In areas with high altitude, large topographic relief, as well as in human activities areas, the correction had a large impact on NPP estimation, and the original model of the oasis area was overvalued. (3) The effect of correction on growth season was greater than that during the non-growth season. Slope had a substantial influence on NPP, and the higher the slope was, the greater the overestimation of the original model. Before correction, sunny slope NPP values were overestimated, whereas, the shady slope NPP values were underestimated.

Key Words: net primary productivity (NPP); CASA model; temperature stress coefficients; moisture stress coefficients;

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41761083,41661084)

收稿日期:2018-02-06; 修订日期:2018-09-15

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

Hexi Corridor

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是陆地生态系统碳循环的重要组成,也是揭示碳源/汇的关键环节,NPP 估算不仅可以反映植被的物质生产能力,也是揭示大气二氧化碳收支和气候环境变化的重要指标^[1-3]。

NPP 估算模型较多,CASA 模型其原型由 Monteith 提出,之后 Potter 和 Field 等^[4]在 Monteith 基础上改进,因结构简单,参数可通过遥感获得,广泛应用于全球和区域尺度上的 NPP 估算^[5-7]。CASA 模型中需要输入气象数据,气象数据一般来源于气象站点,而气象站点通常选择在空旷平坦的地带,因此,通过站点数据直接空间插值的气象数据较难反应复杂地形地区的气候状况,在估算 NPP 时会产生较大的误差。基于 CASA 模型估算 NPP 与气候因子相关的参数有太阳辐射、温度胁迫系数和水分胁迫系数。太阳辐射校正方法比较成熟^[8];温度胁迫因子是通过气温得到的,大部分研究使用如 Kriging、IDW 和 Spline 等方法对气温进行空间插值,效果较差^[9-10],有研究表明,在甘肃省海拔、经度和纬度对气温影响也很大^[11];水分胁迫系数在 CASA 模型中是实际蒸散量与潜在蒸散量的比值,这两个变量是根据经验公式计算,没有考虑到地表植被差异,即相同的比值对不同植被类型的水分胁迫是一样的,显然,这种计算存在较大的不确定性。并且,原 CASA 模型中全球植被的最大光能利用率为 0.389 gC/MJ^[12],对于干旱区并不适用。目前,有很多学者都对 CASA 模型进行了校正^[13-15],但对模型校正前后 NPP 估算的影响却鲜有研究。

河西走廊位于中国西北地区,属于干旱半干旱区,是国家丝绸之路经济带的重要通道,祁连山国家森林公园也位于此,区内景观多样,在自然环境和人类活动双重作用下,该区生态系统非常脆弱,植被退化非常严重,荒漠化发展速度较快^[16]。本文利用校正的 CASA 模型,以气象数据、遥感数据、DEM 数据以及土地利用数据等为基础,针对 CASA 模型的以上缺点,利用海拔、经度和纬度对气温进行校正,并使用地表水分指数(Land Surface Water Index, LSWI)反演水分胁迫系数,最大光能利用率采用冯益明等^[17]针对干旱区得到的不同植被类型上的相应值,估算了 2015 年河西走廊 NPP。旨在提高基于 CASA 模型的 NPP 模拟精度,并着重分析校正前后的 CASA 模型对 NPP 估算的差异及原因,同时也为该区植物生产力评价,生态资产核算,以及生态补偿机制建立提供科学参考。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况

河西走廊地处甘肃省境内,位于黄河以西,南部被祁连山和阿尔金山、北部被合黎山、龙首山以及马鬃山夹持,是古丝绸之路的交通要道,地理位置为 37°17'—42°48' N, 92°12'—103°48' E,行政区划包括武威市、张掖市、金昌市、酒泉市和嘉峪关市(图 1)。河西走廊地势南高北低,南部山地海拔大多在 3000—3500 m 以上;中部走廊平原海拔为 1000—2600 m 左右;北部山地断续分布。河西走廊属于温带大陆性气候,光照强烈,年降水量大部分地区在 35—200 mm,大部分地区的年蒸发量在 1500 mm 以上,年均温 5.8—9.3℃。该区域内植被类型主要有林地、耕地、草地和荒漠。河西走廊由三大流域组成,从东向西依次为石羊河流域、黑河流域和疏勒河流域,三大河流都发源于祁连山,区域内绿洲农业发达。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 遥感数据

本文 2015 年的遥感数据来自美国国家航空航天局(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>),产品是 MOD13Q1(从中选取归一化植被指数——NDVI(Normalized Difference Vegetation Index),为 16 日合成数据,空间分辨率 250 m)、MOD09A1(8 天合成的地表反射率数据,选取近红外波段(841—875 nm)和短波红外波段(1628—1652 nm),空间分辨率为 500 m)和 MOD17A3(选取 NPP,分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 年)。利用 MRT 批处理工具对遥感数据进行了拼接、格式转换和重投影,并在 ArcGIS 中完成掩膜,使用最大合成法

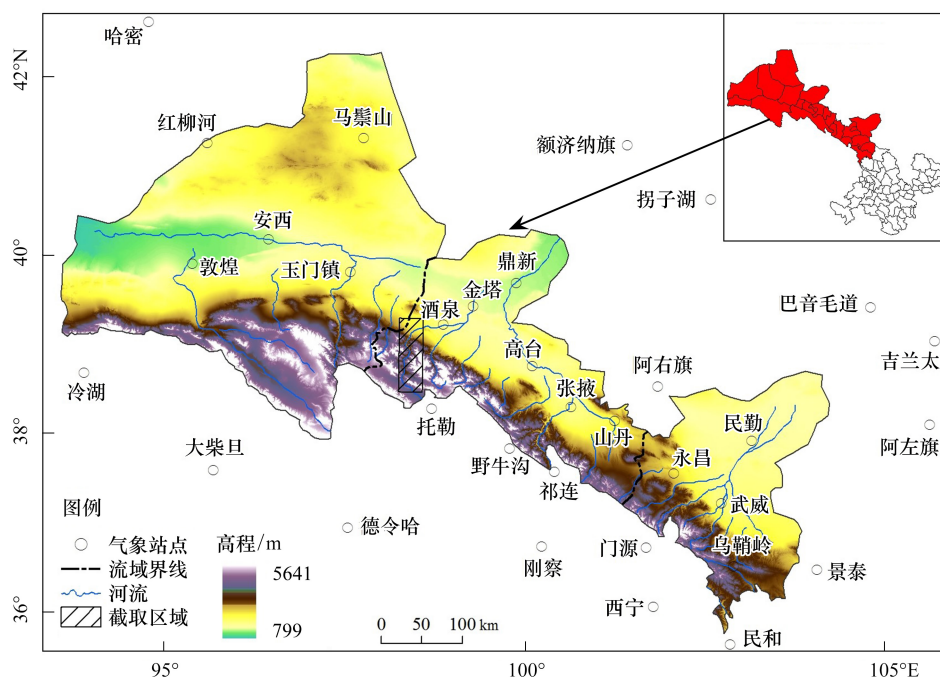


图1 研究区位置及气象站点空间分布图

Fig.1 Location of the study area and spatial distribution of meteorological stations

(Maximum Value Composite, MVC)将 MOD13Q1 和 MOD09A1 产品分别合成月数据。

1.2.2 气象数据

2015 年的气象数据来源于中国气象局气象数据中心 (<http://data.cma.cn/site/index.html>), 剔除数据缺失和有异常值的站点, 最终选取 33 个气象站点的月数据集, 包括: 日照百分率、月平均气温和月降水量数据。

1.2.3 土地利用数据

100 m 分辨率的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>)。本文参照冯益明等^[17]针对甘肃省提出的土地利用/覆盖类型的划分, 将研究区的土地利用/覆盖类型划分为 9 种类型: 耕地、林地、草地、建筑用地、水域、沼泽地、裸沙地、戈壁和其他用地, 并将其分辨率重采样为 250 m。

1.2.4 其他数据

河西走廊行政区划图来源于国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn>)。DEM 数据获取自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>), 在 DEM 基础上提取各栅格单元的海拔、坡度和坡向信息。

2 研究方法

CASA 模型估算植被 NPP 的基本思想是利用植被获取太阳辐射, 加上植被自身利用的情况, 从而估算出植被净生长状况^[18]。模型中所估算的 NPP 可以由植被吸收的光合有效辐射 (APAR) 和实际光能利用率 (ε) 两个因子来表示^[1,4], 公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

式中, x 代表单个像元, t 表示月份, $APAR(x, t)$ 则表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 (gC/m^2), $\varepsilon(x, t)$ 表示单个像元 x 在 t 月的实际光能利用率 (gC/MJ)。

2.1 APAR(x, t) 的估算

$APAR(x, t)$ 是通过植被所能吸收的太阳有效辐射与植被对入射光合有效辐射的吸收比例来确定, 公式如下:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中, $SOL(x, t)$ 表示 t 月在单个像元 x 处的太阳总辐射 (gC/m^2), $FPAR(x, t)$ 表示植被层对入射光合有效辐射的吸收比例, 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射 (波长为 $0.4\text{--}0.7\ \mu\text{m}$) 占太阳总辐射的比例。

由于研究区辐射站点较少, 直接利用站点太阳辐射数据插值误差较大, 故本文 $SOL(x, t)$ 的估算采用和清华等^[8]将天文辐射作为起始值计算西部地区太阳总辐射的公式,

$$Q = Q_A(a + bs) \quad (3)$$

式中, Q 为太阳总辐射; a 、 b 的取值分别为 0.185、0.595; s 表示日照百分率; Q_A 表示天文辐射, 鉴于篇幅有限, 这里不再赘述, 详细计算请参考文献^[8]。

植被对太阳有效辐射的吸收比例取决于植被类型和植被覆盖状况^[19]。研究证明, 由遥感数据得到的归一化植被指数 (NDVI) 能很好地反映植被覆盖状况^[4]。本文利用 NASA-MOD15 算法中设计的 NDVI-FPAR 查找表 (Mynenietal., 1999) 计算每月截取的光合有效辐射比率 (FPAR), 选取的是 MODIS-NDVI 数据, 其数据质量和分辨率都高于原模型中运用的 NOAA/AVHRR NDVI 数据^[20-21], 计算式如下:

$$FPAR = \begin{cases} 0 & \text{NDVI} \leq 0.075 \\ \min\{1.16 \times \text{NDVI} - 0.0439, 0.9\} & \text{NDVI} > 0.075 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 光能利用率的估算

光能利用率是在一定时期单位面积上生产的干物质中所包含的化学潜能与同一时间投射到该面积上的光合有效辐射能之比。环境因子如气温、土壤水分状况以及大气水汽压差等会通过影响植被的光合能力而调节植被的 NPP, 计算公式如下:

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon 1}(x, t) \times T_{\varepsilon 2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (5)$$

式中, $T_{\varepsilon 1}(x, t)$ 和 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用; $W_{\varepsilon}(x, t)$ 为水分胁迫系数, 反映水分条件对光能利用率的影响; $\varepsilon_{\max}$ 是理想条件下的最大光能利用率 (gC/MJ), 取值因植被类型而不同, 取值参考文献^[17]。

2.2.1 温度胁迫系数估算

$T_{\varepsilon 1}(x, t)$ 的估算: 其反映在低温和高温时植被内在的生化作用对光合的限制而降低净初级生产力。

$$T_{\varepsilon 1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}}(x) - 0.0005 \times [T_{\text{opt}}(x)]^2 \quad (6)$$

式中, $T_{\text{opt}}(x)$ 表示某一区域一年内 NDVI 值达到最高时的当月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), 即植被生长的最适温度。

$T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 的估算: 表示环境温度从最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 向高温或低温变化时植被光能利用率逐渐变小的趋势, 这是因为低温和高温时高的呼吸消耗必将会降低光能利用率, 生长在偏离最适温度的条件下, 其光能利用率也一定会降低, 计算公式如下:

$$T_{\varepsilon 2}(x, t) = 1.184 / \{1 + \exp[0.2 \times (T_{\text{opt}}(x) - 10 - T(x, t))]\} \times 1 / \{1 + \exp[0.3 \times (-T_{\text{opt}}(x) - 10 + T(x, t))]\} \quad (7)$$

式中, $T(x, t)$ 表示月均温, $T_{\text{opt}}(x)$ 同上。当月均温 $T(x, t)$ 比最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 高 10°C 或低 13°C 时, 该月的 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 值等于月平均温度 $T(x, t)$ 为最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 时 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 值的一半。

郭婧等提出 AMMRR 插值方法 (“多元回归分析+残差法”) 能充分体现复杂多变的地形特点^[22]。因此, 本文通过经度、纬度和海拔 3 个变量, 利用 AMMRR 方法对气温进行插值, 该插值方法不仅考虑了海拔对气象要素的影响, 而且还利用站点数据与插值数据之间的差值进行了修正, 提高了插值精度^[23-24]。

2.2.2 水分胁迫系数 $W_{\varepsilon}(x, t)$ 的计算

水分胁迫系数 $W_{\varepsilon}(x, t)$ 反映了植被所能利用的有效水分条件对光能利用率的影响, 随着环境中有效水分的增加, $W_{\varepsilon}(x, t)$ 逐渐增大, CASA 模型中它的取值范围为 0.5 (在极端干旱条件下) 到 1 (非常湿润条件下)。

由于 $W_{\varepsilon}(x, t)$ 与植被水分含量直接相关, 地表水分指数 (LSWI), 是描述植被叶片水分含量的一项指标^[25-27]。短波红外 (SWIR) 对植被水分含量敏感, 近红外和短波红外波段已经被用来获取对水分敏感的植被指数 (LSWI), 计算公式如下:

$$W_{\varepsilon}(x, t) = \frac{1 + \text{LSWI}}{1 + \text{LSWI}_{\max}} \quad (8)$$

式中,LSWI 计算公式见(9), $LSWI_{max}$ 表示单个像元生长期内 LSWI 的最大值,使用 MVC 方法估算。

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (9)$$

这里, ρ_{nir} 和 ρ_{swir} 分别表示 MOD09A1 数据的近红外和短波红外波段。

Xiao 等^[25]在 VPM 模型中首次运用该方法,目前已有许多学者将 LSWI 引入 CASA 模型来计算 $W_e(x, t)$ ^[28-29]。值的注意的是,上述公式计算出来的 $W_e(x, t)$ 的取值范围为 0(非常湿润)到 1(极端干旱),与 CASA 模型中 $W_e(x, t)$ 的取值正好相反,为了适应模型算法,Bao 等^[15]提出了修改算法,并证明该方法适用于干旱半干旱区。因此,本文采用地表反射率产品 MOD09A1 计算 $W_e(x, t)$,这不仅增强了数据的准确性,也提高了数据的分辨率,同时遥感数据也包含了地形信息^[30],公式如下:

$$W_e(x, t) = (1 -) + 0.5 \quad (10)$$

3 结果与讨论

3.1 精度评价

对 NPP 的验证可采用实测值验证法和相对验证法两种方法,考虑到研究区范围较大且植被类型复杂,NPP 实测值短时间内较难获取,故本文采用与 NPP 产品比较和与前人的研究成果比较的方法。

MOD17A3 产品已经被验证适用于区域和全球尺度的 NPP 研究^[31-32],也有很多学者将产品与估算值进行比较来判断估算值的可靠性^[33-36]。由于 2015 年的 MOD17A3 产品未更新,只能使用 2014 年产品,本文采用同样的方法估算出 2014 年 NPP,两者随机抽样比较,结果见图 2。可以看出,校正后的 NPP 与 MOD17A3 产品的相关性较强, R^2 为 0.803($P < 0.01$),明显高于校正前的 R^2 (0.681)。

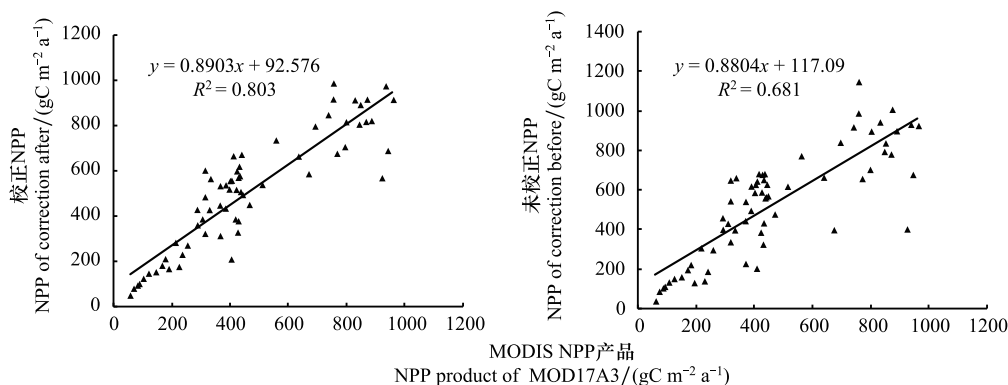


图 2 校正前后 NPP 与 MOD17A3 产品的比较

Fig.2 Comparison between NPP of correction before and after and NPP products of MOD17A3

本文也与前人的相关研究进行了对比,河西走廊 NPP 的估算鲜有研究,因而采用干旱区其他区域的 NPP 均值进行比较,高志强等^[37]利用 CASA 模型估算的 2000 年西北地区年均 NPP 为 $102.52 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。裘骏—^[38]利用 CASA 模型估算中卫市沙坡头自然保护区植被的年均 NPP 为 $60\text{—}135 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;焦伟等^[39]利用 CASA 模型估算了西北干旱区 2000—2014 年的植被 NPP,年均值为 $191.63 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;本文基于校正的河西走廊年均 NPP 为 $151.51 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,与前人的研究结果相近。各植被类型的比较见表 1,分析发现,草地、耕地和荒漠的模拟结果与前人研究的结果相对较好。林地、水域和沼泽与朱文泉和焦伟的结果相差较大。

造成差异的原因较多:一是数据源的差异;二是研究区空间尺度和空间分辨率的差异,可能存在混合像元;三是研究时段不同;四还存在算法的差异等。总的来说,校正后的 NPP 与 MOD17A3 产品相关性更高,与前人的计算结果更加接近,由此判断,校正后的 NPP 估算结果更加准确。

3.2 河西走廊 NPP 的时空分布特征

2015 年河西走廊 NPP 空间分布见图 3,NPP 自东南向西北递减,介于 $0\text{—}1699.31 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,年均值

为 $151.51 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 总量为 34.29 TgC/a , 高值区主要分布在祁连山和绿洲, 低值区分布在北部荒漠, 主要植被类型 NPP 见表 1。

表 1 河西走廊年均 NPP 与文献值的比较/ $(\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1})$

Table 1 Comparison simulated mean NPP with values in references

土地利用/覆盖类型 Land use/land cover types	参考文献 References				本研究 This study	
	[39]	[40]	[41]	[42]	校正前 Before correction	校正后 After correction
林地 Forest	1140.5	496.7	—	686.7	914.95	866.52
耕地 Farmland	376.8	415.6	391.61	746.1	685.71	665.73
草地 Grassland	259.9	252.2	—	233—437	298.40	293.26
水域及沼泽 Water and Marsh	369.0	123.3	79.65	—	161.70	161.03
城镇 Urban land	—	130—190	138.68	—	181.41	177.71
荒漠 Desert	19.4	51.1	55.31	56.3	60.74	66.71

从流域来看, 石羊河流域 NPP 总量为 13.30 TgC/a , 均值为 $307.19 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 黑河流域总量为 13.53 TgC/a , 均值为 $243.59 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 疏勒河流域总量为 7.45 TgC/a , 均值为 $58.44 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。石羊河流域中上游以耕地和草地为主, NPP 值高, 下游荒漠和戈壁面积大, NPP 值低。黑河流域上游祁连山的东南部及南部 NPP 较高, 植被类型主要为森林和草地, 中游绿洲、荒漠和戈壁相间分布。疏勒河流域上游祁连山区的植被类型主要为高山草甸, NPP 较高, 下游荒漠、戈壁广布, NPP 较低, 年累积 NPP 高值区主要集中在绿洲, 范围较小。

3.3 校正结果的比较

3.3.1 校正前后平均气温比较

图 4 为 2015 年 7 月校正前后的月平均气温, 由图可以看出校正后的月平均气温与实际月平均气温更吻合, 更能反映河西走廊复杂的地形特点。校正前的 7 月平均气温都在 10°C 以上, 而河西走廊南部山地的海拔大多在 3000 m 以上, 海拔最高达到了 5641 m , 因此, 虽然 7 月是全年气温最高的月份, 但在海拔较高的地区气温存在低于 0°C 是合理的。总体上, 河西走廊月平均气温由于纬度地带性差异自南向北递减, 同时受海拔的影响也非常显著, 南部祁连山区为气温的低值区, 安敦盆地在全区域气温最高区, 与封志明等^[43]的研究结果一致。

3.3.2 校正前后水分胁迫系数比较

图 5 是 2015 年 1 月和 7 月河西走廊校正前后水分胁迫系数空间分布。河西走廊除祁连山区外属于干旱区, 植被基本都处于水分胁迫状态。校正前 1 月和 7 月的水分胁迫系数在 $0.50—0.58$ 之间, 差异很小, 全区域均处于高度水分胁迫状态, 与祁连山区植物生长的水分胁迫程度并不相符, 王海军等^[44]的研究结果表明祁连山区的降水具有明显的季节性, 冬季降水均在 13 mm 以下, 而在夏季降水量最高可达 247 mm , 因而在夏季祁连山区的水分胁迫程度明显降低。在干旱半干旱地区植被生产力的限制因子随海拔会发生转变, 低海拔地区植被主要受到低降水导致的干旱胁迫, 同时较高的温度导致蒸散增加, 进一步加剧了植被的水分胁迫^[45]。校正后 1 月和 7 月的水分胁迫系数分布在 $0.5—1$ 之间, 更能反映河西走廊制约植被生长的水分胁迫情况, 区别出地形变化对水分胁迫的影响差异, 同时还能较好的识别绿洲等人类活动区。1 月份虽然降水较少, 但植被停止生长并不需要太多水分, 7 月份降水较多, 但植被在生长季需水也最多, 因此, 水分胁迫在生长季 (7 月)

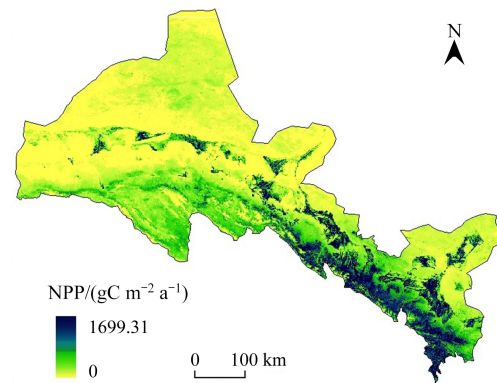


图 3 2015 年 NPP 空间分布图/ $(\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1})$

Fig.3 Spatial distribution of NPP in 2015

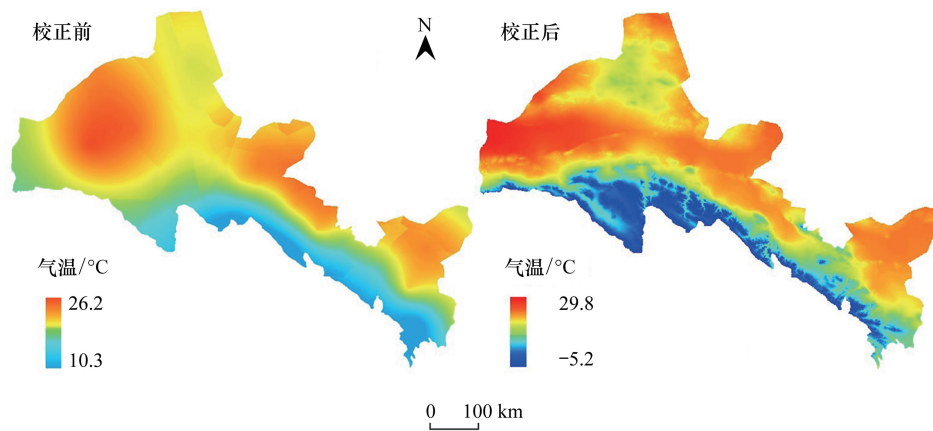


图 4 2015 年 7 月平均气温校正对比

Fig.4 Comparison of mean temperature correction in July, 2015

比 1 月份更高(除祁连山外)是合理的。值的一提的是,水分胁迫系数校正前后的计算原理差异很大,前者是实际蒸散量与潜在蒸散量的比值,只与降水、太阳净辐射和温度有关,与植被无关,后者是根据地表反射率反演水分指数而得,与植被有关,即同样的水分状况,针对不同的植被和不同的生长阶段是不一样的,因此,校正更能反映植被的水分胁迫程度,这种情况在中下游绿洲区表现尤为明显。位于图西北部有部分高值,这是由于 MOD09A1 影像中的云量所致。

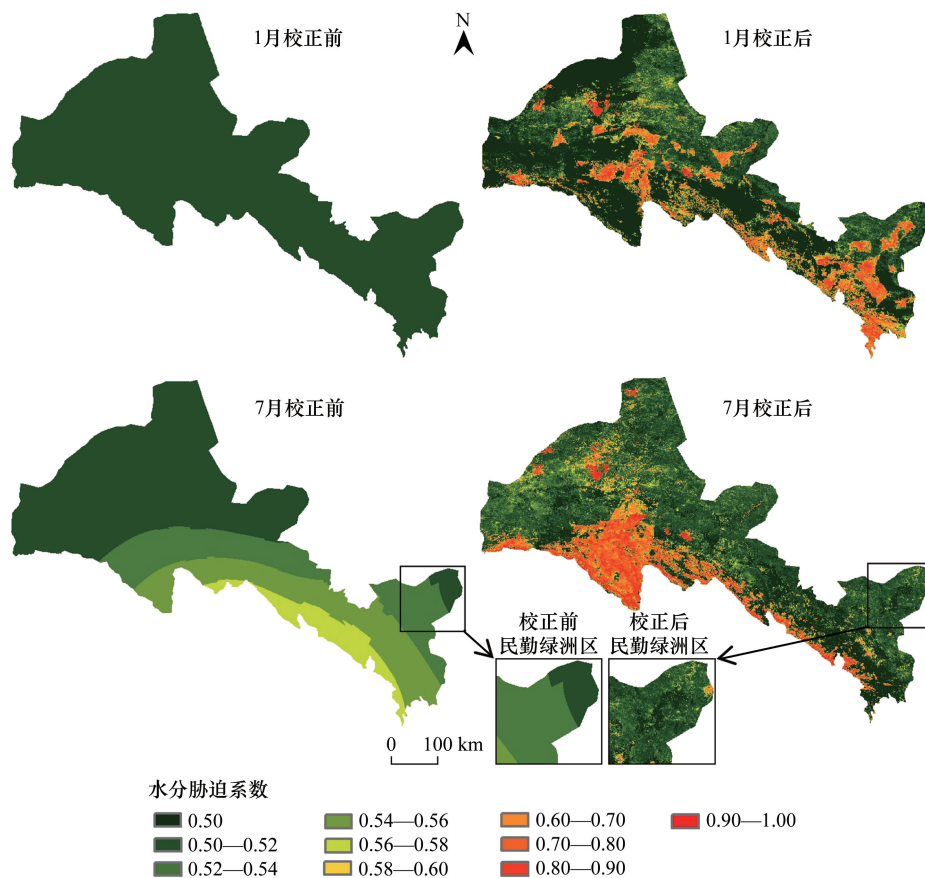


图 5 2015 年 1 月和 7 月水分胁迫系数校正对比

Fig.5 Comparison of moisture stress coefficients in January and July, 2015

3.3.3 校正前后 NPP 比较

2015 年河西走廊校正前后的 NPP 空间分布基本一致,也存在较为明显的差异,见图 6。可以看出,地形平坦的下游荒漠区吻合较好,地形起伏较大的南部高山区,绿洲区存在明显差异,校正前前者低估,后两者高估。整体来看,差值介于 $-526.891-296.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,在山区和绿洲相差较大,平原地区差异较小。

校正对南部高山区的温度胁迫和水分胁迫均有影响,由图 4、5 可以看出,校正前气温高估和水分低估,气温高估导致蒸发量增加,增强该地区的水分胁迫,这个效应与校正前水分低估叠加,加剧水分胁迫导致该区域 NPP 低估。绿洲区地势平坦,校正对气温的影响较小,基于地表反射率的水分胁迫校正能准确反应植被的需

水状态,主要植被类型是耕地,在生长季水分需求大,校正后水分胁迫程度更高,因此校正前 NPP 存在高估。此现象可进一步拓展到人类活动区域,即改变了原始植被类型的区域,校正对水分胁迫系数的影响非常大,进而对 NPP 估算产生影响。除绿洲区外的其他荒漠区地形起伏较小,植被分布稀少,吻合较好。

Sun 等^[46]利用地形校正的 BEPS(Boreal Ecosystem Productivity Simulator)模型模拟了武陵山区 NPP,得出校正后 NPP 低于校正前的地区主要分布在山区,与本研究的高山地区校正前 NPP 低估相反,其原因是武夷山区植被的主要胁迫因子是温度,校正后温度降低使得温度胁迫加强,校正后 NPP 减少。平地区校前后 NPP 偏差较小,在 $10 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以内,高山地区 NPP 偏差可能会达到 $500 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,与本文的结论一致。Chen 等^[47]对秦岭西南部山区 NPP 研究发现地形因子对 NPP 的影响很大,尤其是在山区,也与本文的结果一致。

3.4 讨论

3.4.1 校正对月 NPP 的影响

从 2015 年河西走廊校正前后各月 NPP 变化曲线(图 7)可以看出,各月 NPP 差异并不相同,校正后的 NPP 除 7 月份外均高于校正前,5 月份 NPP 校正的影响相差最大(低估 $14.03 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$)。春季(3、4 和 5 月)是植被开始生长期,对水热的变化最敏感,地形对 NPP 的影响较大,校正前 NPP 低估了 $21.27 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。夏季(6、7 和 8 月)生物量大量累积,也是水热需求量最大的时期,校正前低估了 $6.75 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。秋季(9、10 和 11 月)气温下降,植被基本停止生长,此时植被对水热的需要是维持性的,校正对 NPP 影响较小;冬季(12、1 和 2 月)为非生长季,校正对 NPP 影响可忽略不计。

为了展示校正对月 NPP 的影响细节(图 8),本文在肃南裕固族自治县西部截取高低估和吻合区域相间分布的一部分地区(图 1),海拔介于 $1737-5332 \text{ m}$,地形起伏较大,降水为 $140-216 \text{ mm}$ 。校正非生长季的 1、2、3、11 和 12 月对 NPP 的影响较小,大多处于 $-10-10 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,而在生长季的 4、5、6、7、8、9 和 10 月,校正对 NPP 的影响较大,介于 $-290-161 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。校正前 6、7、8 月份出现较多高估区,该区域海拔较高,气温较低降水比较充沛,主要胁迫因子为温度,校正后温度降低,因此校正前是高估的。

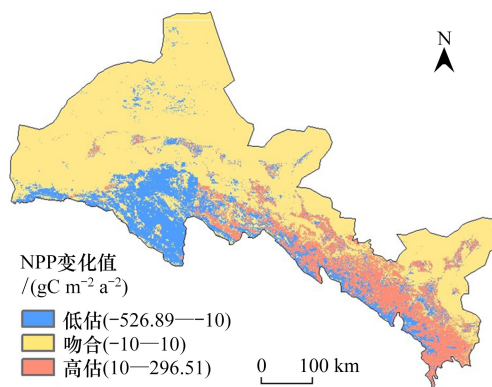


图 6 2015 年 NPP 校正对比

Fig.6 NPP contrast used correction in 2015

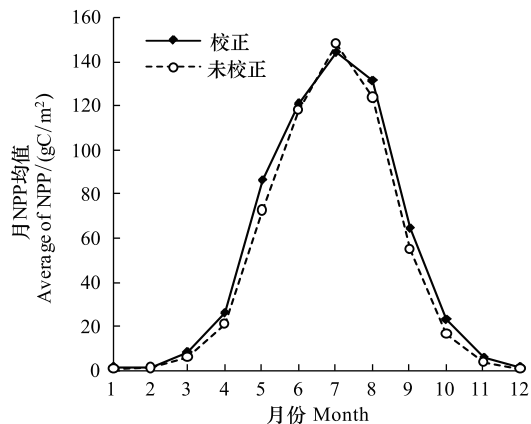


图 7 校正对月 NPP 的影响

Fig.7 Impact of correction on monthly NPP

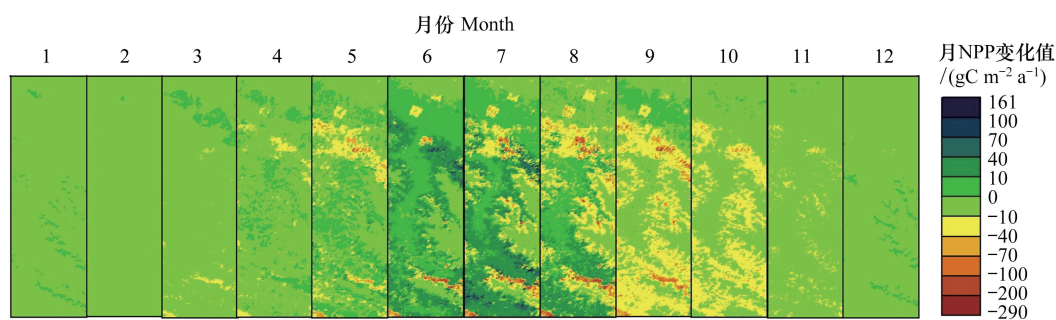


图 8 校正前后月 NPP 的变化

Fig.8 Changes of monthly NPP correction before and after

3.4.2 校正对地形因子与 NPP 关系的影响

地形能够导致局部的水热再分配,尤其是干旱地区,水热组合差异影响植物生长甚至造成植被种类不同^[48]。本文由 DEM 提取出海拔、坡度、坡向信息,利用等差分级法(海拔级差为 30 m^[49]、坡度级差为 3°^[50]、坡向分为 9 级^[51]),校正对 NPP 与地形关系的影响见图 9。

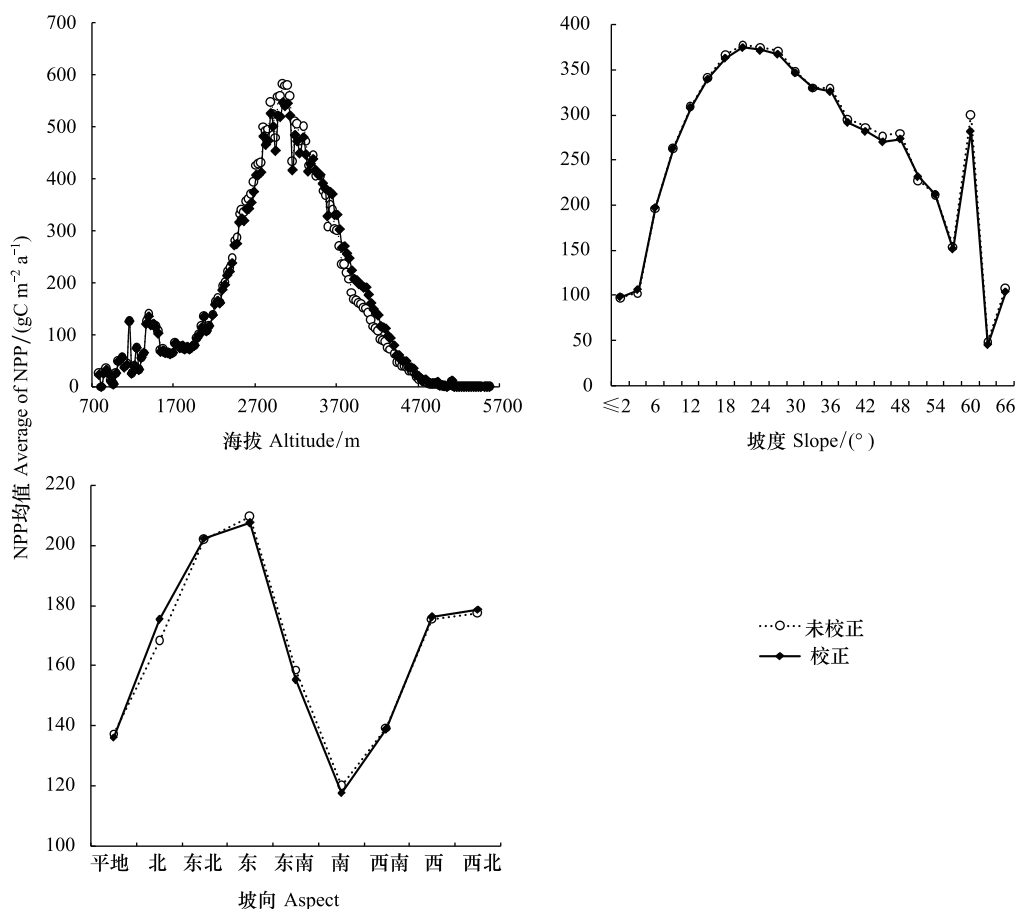


图 9 校正对地形因子与 NPP 关系的影响

Fig.9 Effect of correction on the relationship between terrain factors and NPP

校正对 NPP 在不同海拔范围内的影响各异(图 9)。在 2200 m 以下荒漠所占面积大,地势平坦,校正对 NPP 的影响较小,与上文平原区变化不大结论相符。2200—3500 m 范围内,部分绿洲区处于该高程带,校正前 NPP 高于校正后,其原因是基于 LSWI 的校正更能反映其水分胁迫状况。3500—5000 m 海拔较高,气温下降,植被蒸腾作用减弱,校正后水分更能满足植被生长需求,校正前低估了 NPP。海拔 5000 m 以上的面积非

常小,而且都是冰川雪地,NPP 基本为 0,校正的影响可忽略不计。

校正对坡度与 NPP 关系的影响也较大,主要体现在土壤含水量上,坡度与土壤含水量呈负相关,即随坡度的增大而降低^[52]。小于 15°属于缓坡,坡度对土壤水分持量有的影响不显著^[53],所以校正对该区间影响不大(图 9);大于 15°区间,校正后 NPP 减少,其原因是在重力作用下土壤含水量流失的坡度效应,并且,坡度越大两者的差异越大,因此,随坡度增加校正对 NPP 的影响也越大。

坡向导致地表接受的太阳辐射不同,使得不同坡向水热有显著差异^[54],从而影响植物生长。各个坡向的 NPP 变化见图 9,东坡 NPP 最高,南坡 NPP 最小。校正后北坡,东北坡、西北坡和西坡高于校正前,平地、东坡、东南坡、南坡、西南坡低于校正前。北坡差异最大,校正前低估了 $7.12 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其次是东南坡,校正前高估了 $3.38 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其他坡向的差值都低于 $2 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。坡向校正不能够识别水热在坡向上的变化,校正后阳坡太阳辐射强烈气温高蒸发强烈,水分减少,导致 NPP 减少,阴坡气温低,蒸发较弱,NPP 增加,与 Sun 等^[46]在武陵山区的研究结果一致。

4 结论

(1)温度胁迫系数基于地理因子回归校正,水分胁迫系数基于遥感数据校正能有效提高 CASA 模型的估算精度。河西走廊 NPP 在原 CASA 模型中存在高估,校正后 NPP 总量为 34.29 TgC/a ,原 CASA 模型高估了 0.23 TgC/a 。

(2)校正对高海拔和地形起伏较大区域,以及人类活动地区的 NPP 估算影响较大。在河西走廊,前者主要是温度胁迫的影响造成,后者主要受水分胁迫的影响。

(3)绿洲区校正结果表明,在人类活动区域,基于遥感数据的水分胁迫计算比原模型中基于蒸散量的计算更加可靠,后者存在高估。

(4)校正对月份,海拔、坡度以及坡向与 NPP 关系的影响也较大。校正对生长季的影响大于非生长季;海拔上,2200—3500 m 范围内,校正前高估 NPP,在 3500—5000 m,校正前低估了 NPP;坡度上,校正前高估了 NPP,坡度越大两者的差异越大;坡向上,校正前高估了阳坡 NPP,低估了阴坡 NPP。

本研究的不足之处,一是地表反射率产品存在有云现象,导致部分区域估算不准确。二是太阳辐射是通过克吕格插值得到,精度有待提高。三是缺乏 NPP 实地采样验证,今后拟在上述方面进一步研究。

参考文献(References):

- [1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [2] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y, Peng C H, Ji W. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, 293(5536): 1723-1723.
- [3] 杨会中, 李小明, 刘丽娟, 马金龙, 王进. 基于耦合模型的干旱区植被净初级生产力估算. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1750-1758.
- [4] 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.
- [5] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [6] Li J, Wang Z L, Lai C G, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q. Response of net primary production to land use and land cover change in mainland China since the late 1980s. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 237-247.
- [7] 张猛, 曾永年. 融合高时空分辨率数据估算植被净初级生产力. *遥感学报*, 2018, 22(1): 143-152.
- [8] 和清华, 谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究. *自然资源学报*, 2010, 25(2): 308-319.
- [9] 元志辉, 池勇峰, 雷军, 包刚, 包玉海, 萨楚拉, 咏梅. 2000-2013 年浑善达克沙地植被净初级生产力变化研究. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 185-199.
- [10] 杨文冰. 气候与土地利用覆被变化对中国南方草地 NPP 的影响[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [11] 陈志军. 基于起伏地形下重庆地区的天文辐射、气温分布研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2004.
- [12] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982-1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化. *北京大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(4): 563-569.
- [13] 刘春雨. 省域生态系统碳源/汇的时空演变及驱动机制——以甘肃省为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [14] 李刚, 辛晓平, 王道龙, 石瑞香. 改进 CASA 模型在内蒙古草地生产力估算中的应用. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2100-2106.

- [15] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, Xin X P, Bao Y L, Bayarsaikan S, Zhou Y, Chuntai B. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46: 84-93.
- [16] 傅伯杰, 刘国华, 孟庆华. 中国西部生态区划及其区域发展对策. *干旱区地理*, 2000, 23(4): 289-297.
- [17] 冯益明, 姚爱冬, 姜丽娜. CASA 模型的改进及在干旱区生态系统 NPP 估算中的应用. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(8): 39-43.
- [18] 项阳, 李君轶, 陈宏飞. 基于 CASA 模型的神东矿区植被 NPP 变化研究. *湖北农业科学*, 2017, 56(10): 1843-1846, 1856-1856.
- [19] 李伟, 张国明, 李兆君. 东亚地区陆地生态系统净第一性生产力时空格局. *生态学报*, 2008, 28(9): 4173-4183.
- [20] 杨东辉. 基于 MODIS 数据的石羊河上游植被净第一性生产力变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2011.
- [21] 彭代亮. 基于统计与 MODIS 数据的水稻遥感估产方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [22] 郭婧, 柳小妮, 任正超. 基于 GIS 模块的气象数据空间插值方法新改进——以甘肃省为例. *草原与草坪*, 2011, 31(4): 41-45, 50-50.
- [23] 魏靖琼, 柳小妮, 任正超, 潘冬荣, 王红霞. 区域尺度下气候因子的插值优化及其与草地 NPP 的相关性. *草业科学*, 2012, 29(12): 1842-1848.
- [24] 田文婷. 疏勒河流域植被净初级生产力估算及其时空变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [25] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz, M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore III B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [26] Xiao X, Boles S, Frolking S, Salas W, Moore III B, Li C, He L, Zhao R. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(15): 3009-3022.
- [27] 闫慧敏, 肖向明, 黄河清. 黄淮海多熟种植农业区作物历遥感检测与时空特征. *生态学报*, 2010, 30(9): 2416-2423.
- [28] 孙银良, 周才平, 石培礼, 宋明华, 熊定鹏. 西藏高寒草地净初级生产力变化及其对退牧还草工程的响应. *中国草地学报*, 2014, 36(4): 5-12.
- [29] 赵芬. 基于 CASA 模型的锡林郭勒盟草地净初级生产力遥感估算与验证[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [30] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [31] 李恒凯, 欧彬, 刘雨婷. 基于 MOD17A3 的南岭山地森林区植被 NPP 时空分异分析. *西北林学院学报*, 2017, 32(6): 197-202.
- [32] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 常庆瑞. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 244-253.
- [33] 王钊, 李登科. 2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [34] 王芳, 汪左, 张运. 2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. *生态学报*, 2018, 38(8): 2754-2767.
- [35] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 164-176.
- [36] 雷延鹏, 孙智辉, 蒋小莉, 刘志超, 曹雪梅, 冯璐, 王理. 基于 MOD17A3 的陕北植被净初级生产力变化特征研究. *安徽农业科学*, 2017, 45(36): 55-57, 93-93.
- [37] 高志强, 刘纪远. 中国植被净生产力的比较研究. *科学通报*, 2008, 53(3): 317-326.
- [38] 裘骏一. 基于 CASA 模型的中卫沙坡头自然保护区 NPP 时空变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [39] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. *遥感学报*, 2005, 9(3): 300-307.
- [40] 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. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 181-189.
- [41] 刘金平, 古丽·加帕尔, 赵金, 张鹏飞, 包安明. 多尺度遥感数据融合的荒漠净初级生产力估算. *干旱区研究*, 2015, 32(3): 592-597.
- [42] Pan S F, Tian H Q, Lu C Q, Dangal S R S, Liu M L. Net primary production of major plant functional types in China: vegetation classification and ecosystem simulation. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 28-36.
- [43] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 林忠辉. 气象要素空间插值方法优化. *地理研究*, 2004, 23(3): 357-364.
- [44] 王海军, 张勃, 靳晓华, 张华, 柳景峰, 戴声佩. 基于 GIS 的祁连山区气温和降水的时空变化分析. *中国沙漠*, 2009, 29(6): 1196-1202.
- [45] 李翔, 王忠, 赵景学, 罗天祥. 念青唐古拉山南坡高寒草甸生产力对温度和降水变化的敏感性及其海拔分异. *生态学报*, 2017, 37(17): 5591-5601.
- [46] Sun Q L, Feng X F, Ge Y, Li B L. Topographical effects of climate data and their impacts on the estimation of net primary productivity in complex terrain: A case study in Wuling mountainous area, China. *Ecological Informatics*, 2015, 27: 44-54.
- [47] Chen J M, Chen X, Ju W. Effects of vegetation heterogeneity and surface topography on spatial scaling of net primary productivity. *Biogeosciences*, 2013, 10(7): 4879-4896.
- [48] 李国亮, 赵军. 黑河流域上游草地 NPP 分布及其与地形因子的关系分析. *甘肃科技*, 2013, 29(21): 30-32.
- [49] 詹蕾. SRTM DEM 的精度评价及其适用性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- [50] 朱梅, 李发源. 坡度分级对地面坡谱的影响研究. *测绘科学*, 2009, 34(6): 165-167.
- [51] 额日敦同拉嘎. 基于 DEM 的内蒙古大青山林地景观格局分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2013.
- [52] 赵琛, 张兰慧, 李金麟, 田杰, 吴维臻, 金鑫, 张喜凤, 蒋忆文, 王晓磊, 贺缠生, 白晓. 黑河上游土壤含水量的空间分布与环境因子的关系. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(3): 338-347.
- [53] 贾海坤, 刘颖慧, 徐霞, 王昆, 高琼. 皇甫川流域柠条林地水分动态模拟——坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 910-917.
- [54] 赵永, 沙晋明. 地形因子对福州市水热空间分布影响的分析. *遥感信息*, 2007, (6): 68-72.