

DOI: 10.5846/stxb201809141984

周妍妍, 朱敏翔, 郭晓娟, 李凯, 苗俊霞, 郭建军, 徐晓锋, 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): - .

Zhou Y Y, Zhu M X, Guo X J, Li K, Miao J X, Guo J J, Xu X F, Yue D X. Relative effects of climate change and human activities on net primary productivity in Shule River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

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

周妍妍¹, 朱敏翔¹, 郭晓娟¹, 李凯¹, 苗俊霞¹, 郭建军², 徐晓锋³, 岳东霞^{1,*}

¹ 兰州大学, 资源环境学院, 兰州 730000

² 中国科学院西北生态环境资源研究院, 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000

³ 兰州大学, 管理学院, 兰州 730000

摘要: 气候变化和人类活动是对陆地生态系统碳循环产生重要影响的两个因素, 定量评估气候变化与人类活动对植被净初级生产力 (NPP) 的相对影响, 对深入理解其驱动机制和控制荒漠化发展具有重要意义。以疏勒河流域为研究区, 利用遥感和气象数据计算潜在 NPP (PNPP) 及其与实际 NPP (ANPP) 之间的差值, 分别衡量了气候变化和人类活动对流域 NPP 的相对影响。研究表明: (1) 2001—2015 年疏勒河流域年 ANPP 整体呈缓慢增加趋势, 与全国和西北地区相比, 普遍较低, 流域植被整体生产力水平不高。流域年 ANPP 空间分布呈现上游祁连山区和中下游绿洲区 ANPP 较高, 而中下游荒漠戈壁区 ANPP 较低的分布格局。(2) 2001—2015 年流域年 PNPP 的变化趋势表明, 降水量的变化是导致疏勒河流域植被退化加剧或缓解的主要气候驱动因素, 但气温的变化对植被的影响较为复杂。(3) 2001—2015 年流域大部分地区植被退化系人类活动造成的, 但人类活动的负向影响力在减弱。(4) 气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对影响均表现出明显的空间异质性, 其中人类活动是疏勒河流域植被变化的主要驱动因素。

关键词: 净初级生产力; 气候变化; 人类活动; 定量评估; 疏勒河流域

Relative effects of climate change and human activities on net primary productivity in Shule River Basin

ZHOU Yanyan¹, ZHU Minxiang¹, GUO Xiaojuan¹, LI Kai¹, MIAO Junxia¹, GUO Jianjun², XU Xiaofeng³, YUE Dongxia^{1,*}

¹ College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

² Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

³ School of Management, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Climate change and human activities are two factors that have important effects on the carbon cycles of terrestrial ecosystems. Quantitative assessment of the relative effects of climate change and human activities on net primary productivity (NPP) of the ecosystem could significantly improve understanding of the mechanisms driving the system and help prevent desertification expansion. We used Shule River Basin as the study area. The potential NPP (PNPP) was calculated using remote sensing and meteorological data, and the difference between the PNPP and actual NPP (ANPP) during the period 2001 - 2015 was used to assess the effect of climate change and human activities on the NPP in the basin. The following

基金项目: 国家自然科学基金 (41671516; 41701623); 甘肃省国际科技合作专项 1604WKCA002; 甘肃省软科学专项 (1504ZKCA090-1); 中科院西北生态环境资源研究院青年人才成长基金

收稿日期: 2018-09-14; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dxue@lzu.edu.cn

conclusions were made: (1) the annual ANPP of the Shule River Basin increased slowly and was generally lower than that in Northwest China and the average for China. The overall productivity of vegetation in the basin was not high. The spatial distribution results showed that the annual ANPP was high in the upstream Qilian Mountains and the mid-downstream oasis region and low in the mid-downstream Gobi region. (2) The annual PNPP trend between 2001 and 2015 indicated that precipitation is the primary factor driving vegetation degradation in the Shule River Basin, but the effect of temperature change on vegetation is complex. (3) Between 2001 and 2015, vegetation degradation was caused by human activities in most areas of the basin, but the negative effect of human activities is weakening. (4) The spatial heterogeneity was detected from the relative effects of climate change and human activities on the NPP, but human activities were the main factors driving vegetation change in the Shule River Basin.

Key Words: net primary productivity; climate change; human activities; quantitative evaluation; Shule River Basin

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)被定义为绿色植物单位时间和空间通过植被光合作用从大气吸收的二氧化碳净量,它等于光合作用吸收的碳与自养呼吸释放的碳之间的差值^[1-2]。它不仅直接反映了植被在自然环境条件下的植被恢复或退化及陆地生态系统的质量状况,也是判定生态系统碳源/汇和调节生态过程的主要因子,在全球变化及碳循环中扮演着重要的角色^[3-4]。全球许多地区的气候变化和人类活动对自然生态系统的影响日益显著,NPP 已成为衡量生态系统对其响应的不可或缺的指标^[5-6]。随着遥感技术、GIS 技术以及计算机技术的发展,利用遥感数据进行植被生产力的研究成为可能。遥感具有时空分辨率高、实时性强、周期短、覆盖面积大、获取便捷等特点,已成为评估从区域到全球尺度植被生产动态的主流方法,其中基于遥感的 CASA 模型(Carnegie—Ames—Stanford Approach)是利用光合有效辐射和考虑温度和降水量影响的光的利用效率进行 NPP 计算^[7],已在不同空间和时间尺度被广泛应用^[8-11]。准确定量评估气候变化与人类活动在植被变化中的相对作用,对深入理解植被变化驱动机制和控制荒漠化发展具有重要意义,其定量研究的主要方法有残差分析法、降水利用效率分析法、模型变量分析法、变异系数分析法^[12]和潜在 NPP (Potential NPP, PNPP)与实际 NPP (Actual NPP, ANPP)求差法^[13]。ANPP 指基于模型计算的现实情况下的净初级生产力,PNPP 指未受人类活动干扰的、潜在的天然植被的 NPP。ANPP 和 PNPP 的差值是人类活动所导致的 NPP 损失或增加量,也可被认为是因土地利用变化及人类活动对植被 NPP 造成的影响,即人类活动影响的 NPP (Human NPP, HNPP),正 HNPP 意味着人为引起植被退化发生,而负 HNPP 意味着人类活动导致植被恢复。将只受气候影响的 PNPP 与只受人类活动影响的 HNPP 进行比较,可以定量评价气候变化和人类活动在 NPP 变化过程中的相对作用,揭示植被变化的驱动机制,对了解生态系统结构与功能的变化以及这种变化对人类社会的反馈作用具有重要的现实意义^[14-15],因此 PNPP 与 ANPP 求差法被广泛应用。Zhang 等^[16]和 Zhou^[17]分别应用该方法研究了石羊河流域和中国西北地区,气候变化和人类活动的对植被退化区和恢复区 NPP 影响的空间分布;Chen 等^[18]通过该方法发现人类活动对青藏高原高寒草原生态系统的影响明显加剧,而气候变化对生态系统造成的负面影响在相对减轻;Zhou 等^[19]利用遥感技术监测了中国草地退化的现状,并发现人类活动是草原恢复的主要因素。然而,已有的对疏勒河流域^[20-21]、甘肃省^[22-23]甚至西北地区^[24-26]的 NPP 研究多为时空变化分析及其影响因素研究,而对影响因素中气候变化和人类活动的相对作用的定量研究较为缺乏。

中国西北干旱区的疏勒河流域,降水极少,气候干旱,生态环境恶劣、脆弱。近年来疏勒河流域受气候变化和人类活动加剧的影响,生态越发脆弱,因此本文利用 CASA 模型计算植被的 ANPP 变化作为疏勒河流域 2001—2015 年植被状况变化的量化指标,然后根据气候条件确定了研究区 PNPP,并通过计算 PNPP 和 ANPP 之间的差异获得 HNPP,不仅可以从空间格局上分析其影响因子贡献率大小的区域差异性,也可以定量评价人类活动在 NPP 变化过程中的相对作用和主要贡献,对了解生态系统结构与功能的变化、以及这种变化对人为环境的反馈作用具有重要的现实意义。

1 研究区概况

疏勒河流域地处我国西北干旱区腹地(图1),位于东经 $93^{\circ}22' - 98^{\circ}59'E$, 北纬 $38^{\circ}1' - 42^{\circ}47'N$, 流域面积约 $1.25 \times 10^5 \text{ km}^2$, 是甘肃河西走廊三大主要内陆河流域之一。流域内干流为疏勒河, 全长 670 km, 主要支流有党河、白杨河、石油河、榆林河及阿尔金山北麓的长草沟、鄂博沟、洪水沟等诸支流。疏勒河流域属于大陆性荒漠型气候, 风沙大, 气候干旱, 年均降水量 47—63 mm, 而蒸发量为 2897—3042 mm, 年平均气温为 6.9—8.8℃, 是甘肃省降雨量最少的地区。植被覆盖度较低, 以戈壁和裸岩石质地为主, 上游高海拔地区分布有低矮灌丛和草地, 且有冰川和永久性积雪区, 中下游分布有呈带状的绿洲区, 呈现出山地—绿洲—荒漠生态系统, 生态环境十分脆弱。疏勒河流域范围包括酒泉市下辖的敦煌市、玉门市、肃北蒙古族自治县、瓜州县、阿克塞县及青海省天峻县和德令哈市的一部分。流域内有享誉国际的敦煌莫高窟、月牙泉、阳关和玉门关遗址等世界文化遗产, 是我国“一带一路”发展战略实施的重要节点区域, 将其建设成为我国西部干旱区生态文明保护屏障, 对国家中长期发展规划, 战略定位、产业布局、生态环境保护与建设具有重要的战略意义。

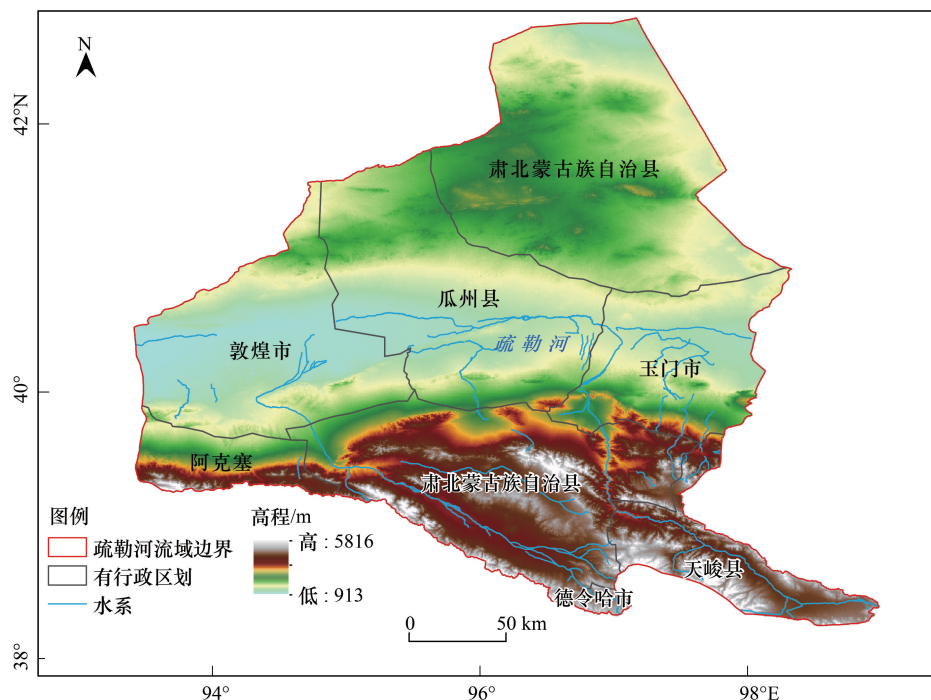


图1 研究区:疏勒河流域图

Fig.1 The study area: Shule River Basin in Northwest China

2 数据与研究方法

2.1 数据来源及处理

本文所需的基础数据包括:遥感数据、植被类型数据和气象数据。遥感数据来自 NASA EOS/MODIS, 其中 2001—2015 年植被指数 (NDVI) 选用 250 m 分辨率的 16 天合成产品 MOD13Q1 数据集, 使用最大值合成法 (Maximum Value Composition, MVC) 生成逐月最大 NDVI 数据。2001—2015 年的 ANPP 数据选用分辨率 1000 m 的 MOD17A3 数据集。植被类型数据是根据 2000、2005、2010 和 2015 年疏勒河流域 4 期 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感数据 (30 m 分辨率) 解译获得。蒸散发和潜在蒸散发数据来自全球陆面数据同化系统 (Global Land Data Assimilation System, GLADS) 数据集, 空间分辨率为 0.25° , 时间分辨率为 1 个月; 月均温、月降水和月太阳辐射数据来自中国寒区旱区科学数据中心, 其空间分辨率为 0.1° 。数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据来自于中国地理空间数据云, 其空间分辨率是 30 m。模型中所有输入参数, 转换成相同的

坐标系统,重采样为 1000 m 分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 ANPP 的计算及精度检验

CASA 模型为广泛应用的光能利用率模型^[27-31],其原理是通过太阳辐射、NDVI、植被类型、气候气象数据等原始数据,以及最大光能利用率等经验数据,来估算植被的 ANPP。在该模型中,ANPP 主要由植物吸收的光合有效辐射和光能利用率两个变量来确定:

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

式中, t 表示时间, x 表示空间位置; $\text{APAR}(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份吸收的光合有效辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{月}^{-1}$); $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份的实际光能利用率 ($\text{gC MJ}^{-1} \text{月}^{-1}$)。

CASA 模型具体计算式见表 1。

表 1 CASA 模型参数计算公式

Table 1 The CASA model parameter calculation formula

编号 No.	计算公式 Calculation formula	参数说明 Parameter description
1	$\text{APAR}(x, t) = \text{SOL}(x, t) \times \text{FPAR}(x, t) \times 0.5$	式中, $\text{SOL}(x, t)$ 是 t 月份像元 x 处的太阳总辐射量 ($\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$); $\text{FPAR}(x, t)$ 为植被层对入射光合有效辐射 (PAR) 的吸收比例,由 NDVI 数据可算得;常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射 (波长为 0.4—0.7 μm) 占太阳总辐射的比例。
2	$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon 1}(x, t) \times T_{\varepsilon 2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon^*$	$T_{\varepsilon 1}$ 和 $T_{\varepsilon 2}$ 表示温度对光能利用率的影响, W_{ε} 为水分胁迫影响系数,代表水分条件的影响, ε^* 为理想状态下的最大光能利用率 ($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。通常认为全球中的植被最大光能利用率是 0.389 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。
3	当某一月平均温度 $\leq -10^\circ\text{C}$ 时, $T_{\varepsilon 1}(x, t) = 0$, 否则, $T_{\varepsilon 1}(x, t) = 0.8 + 0.02 T_{\text{opt}}(x) - 0.0005 [T_{\text{opt}}(x)]^2$	反映在低温和高温时植物内在的生化作用对植物光合作用的限制而降低 NPP 的积累 ^[8] ; $T_{\text{opt}}(x)$ 为最适宜温度。
4	当某一月平均温度 $T(x, t) < T_{\text{opt}}(x) - 13$ 或 $T(x, t) > T_{\text{opt}}(x) + 10$ 时,该月的 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 等于月平均温度为最适宜温度时的 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 值的一半, 否则, $T_{\varepsilon 2}(x, t) =$ $\frac{1.184}{\{1 + e^{0.2[T_{\text{opt}}(x) - 10 - T(x, t)]}\} \times \{1 + e^{0.3[-T_{\text{opt}}(x) - 10 + T(x, t)]\}}$	环境温度从最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 向高温和低温变化时植物光能利用率逐渐变小的趋势。
5	$W_{\varepsilon}(x, t) = \frac{0.5[E_p(x, t) + E(x, t)]}{E_p(x, t)}$	其中, $E(x, t)$ 为区域实际蒸散量 (mm), $E_p(x, t)$ 为区域潜在蒸散量 (mm)

太阳总辐射量 $\text{SOL}(x, t)$, 来自中科院数据集;植被指数 NDVI 来自遥感数据 MOD13Q1 数据;月平均气温来自中科院数据集;区域实际蒸散量 $E(x, t)$ 和区域潜在蒸散量 $E_p(x, t)$ 来自 GLADS 数据集

本文在利用 CASA 模型计算 2001—2015 年逐月 ANPP 的基础上,将每年 12 个月的 ANPP 合成年 ANPP, 并进行精度验证。精度验证一般有两种方法:一是将模拟值与实测值进行比较;二是将估算的 ANPP 数据与他在相同区域计算的结果或遥感数据产品进行比较^[32]。由于疏勒河流域 ANPP 实测数据较少,本文将疏勒河流域各土地利用/覆被类型的模拟 ANPP 与其他学者的模拟结果及 MOD17A3 数据产品进行对比。MOD17A3 植被产品是基于 MODIS 传感器获得的通过 Biome—BGC 模型^[33] 计算出全球精确的陆地植被 ANPP 年际变化数据产品。该数据集已在全球和区域 ANPP 与碳循环研究中得到广泛应用。

2.2.2 PNPP 的估算

本文应用 Thornthwaite Memorial 模型计算 PNPP^[2]。该模型是第一个被广泛接受的 PNPP 估算模型,是基于场地测量的 NPP 数据与研究区温度和降水数据之间的最小二乘回归得出的。PNPP 预测仅受气候因子的影响,被认为是生态系统的最大 NPP^[34]。计算公式如下:

$$\text{PNPP} = 3000[1 - e^{-0.0009695(v-20)}] \quad (2)$$

式中,PNPP 是年总 PNPP($\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$); v 是年平均实际蒸散发量(mm),其计算公式如下:

$$v = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + (1 + 1.05r/L)^2}} \tag{3}$$

$$L = 3000 + 25q + 0.05 q^3 \tag{4}$$

式中, L 是年平均蒸散量(mm); r 是年总降水(mm); q 是年平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

2.2.3 植被动态变化分析

NPP 动态是土地退化最直观的体现,因此,利用 NPP 的多年变化趋势来评估植被退化或恢复。斜率通过普通最小二乘法确定。公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{15 \times \sum_{i=1}^{15} (i \times \text{NPP}_i) - \sum_{i=1}^{15} i \times \sum_{i=1}^{15} \text{NPP}_i}{15 \times \sum_{i=1}^{15} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{15} i\right)^2} \tag{5}$$

式中, $i=1,2,\dots,15$ 分别代表 2001,2002, $\dots$ 2015 年; NPP_i 表示第 i 年的 NPP 值; Slope 表示 NPP 在 n 年间的变化趋势(使用 t 检验进行趋势显著性检验)。

研究时间段内 NPP 的变化量,用以下公式估算:

$$\Delta\text{NPP} = (n - 1) \times \text{Slope}^{[35]} \tag{6}$$

2.2.4 情景设计和定量评估方法

确定了气候变化与人类活动导致的 NPP 变化,则可以定量评估气候变化与人类活动在 NPP 变化中的相对作用。参考了郭继凯等^[36]有关 NPP 变化的情景设定方案,籍此度量疏勒河流域气候变化与人类活动对 NPP 的影响,如表 2 所示。

表 2 评估不同情景下植被恢复或退化驱动因子贡献率的方法

Table 2 Method for assessing the contribution rate of driving factors of vegetation restoration or degradation in different scenarios							
情景 Scenario		S_A	S_P	S_H	气候变化的 相对作用 Relativeeffects of climate change/%	人类活动的 相对作用 Relativeeffects of human activities/%	说明 Description
植被改善区 The areas with improved vegetation	情景 1	>0	>0	>0	100	0	气候变化综合作用导致植被覆盖改善
	情景 2	>0	<0	<0	0	100	人类活动综合作用导致植被覆盖改善
	情景 3	>0	>0	<0	$\frac{\Delta\text{PNPP}}{\Delta\text{PNPP}+\Delta\text{HNPP}} \times 100\%$	$\frac{\Delta\text{HNPP}}{\Delta\text{PNPP}+\Delta\text{HNPP}} \times 100\%$	气候变化和人类活动共同促进植被覆盖改善,以其各自 NPP 变化量所占的比例为各自的相对作用
植被退化区 The areas with degenerated vegetation	情景 1	<0	<0	<0	100	0	气候变化综合作用导致植被覆盖退化
	情景 2	<0	>0	>0	0	100	人类活动综合作用导致植被覆盖退化
	情景 3	<0	<0	>0	$\frac{\Delta\text{PNPP}}{\Delta\text{PNPP}+\Delta\text{HNPP}} \times 100\%$	$\frac{\Delta\text{HNPP}}{\Delta\text{PNPP}+\Delta\text{HNPP}} \times 100\%$	气候变化和人类活动共同促进植被覆盖退化,以其各自 NPP 变化量所占的比例为各自的相对作用

S_A :实际净初级生产力的斜率 Slope for actual net primary productivity; S_P :潜在净初级生产力的斜率 Slope for potential net primary productivity;
 S_H :人类活动影响下的实际净初级生产力的斜率 Slope for human net primary productivity;PNPP:潜在净初级生产力 Potential net primary
productivity;HNPP:人类活动影响下的实际净初级生产力 Human net primary productivity; ΔPNPP 和 ΔHNPP 分别为 PNPP 和 HNPP 变化量

3 结果与分析

3.1 结果验证

由表 3 可以看出,基于 CASA 模型的 NPP 模拟值与其他学者模拟结果反映出的趋势较为一致,说明 CASA 模型应用到疏勒河流域 NPP 研究是可靠的。而疏勒河流域 ANPP 值主要集中在 50—100 gC m⁻² a⁻¹ 内,整体上林地和耕地的 NPP 值最大,未利用地小,相较于全国及西北的 ANPP,该流域整体生产力水平不高。但不同学者估算的 NPP 结果之间却存在差异,这与研究区的时空范围及基础数据的分辨率和质量等的差异有关,这也是导致目前区域 NPP 模拟困难的原因之一^[32]。

表 3 ANPP 多年平均值与其他学者模拟的比较/(gC m⁻² a⁻¹)

研究时段 Study period	模型/产品 Model/Product	研究范围 Study scale	土地利用/覆被类型 Land use/Land cover				
			耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water	未利用地 Unused land
2001—2015	CASA	疏勒河流域(本文)	169.17	103.65	89.20	67.81	52.46
2001—2010	CASA	疏勒河中上游 ^[20]	345.39	455.98	299.74	61.31	49.94
2001—2015	MOD17A3	疏勒河上游	215.30	127.35	125.66	127.18	109.90
2001—2010	CASA	西北干旱区 ^[26]	415.6	196.5	252.2	123.3	51.1
1901—2010	CASA	中国 ^[37]	746.1	713.1	135.0	371.4	56.3

3.2 疏勒河流域 ANPP 空间特征及年际变化

疏勒河流域 ANPP 空间分布整体上呈现南高北低,即上游的祁连山区和中下游的绿洲区 ANPP 较高,其余荒漠戈壁区 ANPP 较低,表现出较为明显的空间异质性(图 2 的左图)。这是由于该流域地处内陆地区,降水量少,气温高,蒸发量大,气候十分干燥,所以水分是该流域 ANPP 的主要限制因子^[21]。如果降水稀少且没有灌溉条件,植被生长稀少,ANPP 值较低;反之,受祁连山区的地表径流影响的绿洲地带,植被生长好,ANPP 值较高。上游祁连山区降水量较大,植被覆盖度高,ANPP 的数值主要在 100—200 gC m⁻² a⁻¹ 之间。其中,高值分布于河流源头和河道两岸;南部冲积扇前的荒漠戈壁 ANPP 普遍较低,最低值分布在大雪山、疏勒南山以及党河南山的现代冰川上,这些区域常年覆盖冰雪,植被基本无法生长。中下游的绿洲区,也是主要的灌溉区,ANPP 较高,主要分布在 200—300 gC m⁻² a⁻¹。高值区集中分布于灌溉农田区,而农业绿洲外围的荒漠戈

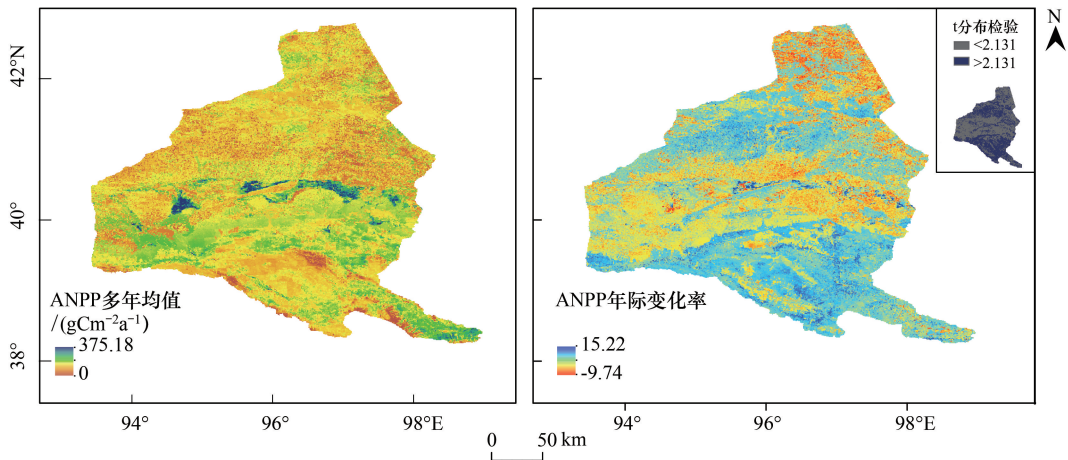


图 2 2001—2015 年疏勒流域 ANPP 多年平均值及其年际变化率空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of mean annual ANPP and its interannual variation of Shule River basin in 2001—2015

ANPP:实际净初级生产力 Actual net primary productivity

壁区以及敦煌市南部的沙漠区域,ANPP 较低。北部的马鬃山区植被稀疏,ANPP 主要分布在 $0\text{--}50\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,高值区零星的分布其中。

图 2 的右图为 15 年来疏勒河流域年 ANPP 的变化趋势及其显著性检验,流域年 ANPP 呈缓慢增加趋势,且流域中呈增加趋势的面积大于呈减小趋势的面积。显著性在 $\alpha = 0.05$ ($v = 15$, 临界值为 2.131) 水平上,47.16% 的区域趋势显著。ANPP 增加的区域占全流域面积的 54%,主要分布于南部的肃北和天峻的大部、阿克塞的东部和南部及北部肃北和瓜州的交界部分。疏勒河流域近 15 年的温度和降水量都有所增加,气候呈现出明显的暖湿化趋势,并且这两种变化都会影响植被生产力^[38]。ANPP 减少的区域占总面积的 46%,主要分布于北部的肃北、敦煌的西部和南部及中下游绿洲的南北两侧。然而,诸如过度放牧、地下水超采、水资源利用过渡等人类活动的加剧是导致流域植被退化的主导因素^[21]。此外,由于祁连山冰川消融,该区域蒸发量大、降水量年际变化大,土地用途也不断增加,这也对植被退化有着巨大的潜在影响^[39]。

3.3 气候变化对植被的影响

PNPP 的年变化趋势及显著性检验如图 3 所示。PNPP 呈增加趋势的面积占研究区总面积的 55%,显著变化的面积占 48.07%;PNPP 呈减少趋势的面积占研究区总面积的 45%,主要分布在瓜州及敦煌的西部边缘部分。疏勒河流域地处我国西北干旱区,植被对降水敏感,且易受气候变暖影响。由图 4 可知,年均温的变化趋势以上升为主,年总降水量变化趋势空间分布与 PNPP 的变化趋势相似。PNPP、气温和降水的年变化趋势图叠加分析表明,气温上升和降水量增加在一定程度上促进了植被恢复和沙漠化改善,而气温的上升和降水量减少导致了植被和土壤的退化加剧。

3.4 人类活动对植被的影响

HNPP 的空间分布表明,在 2001—2015 年期间大部分地区是由于人类活动造成的 NPP 损失(图 5)。HNPP>0 的总面积占研究区总面积的 83%,意味着人类活动对植被的负向影响在整个流域中较为普遍;HNPP<0 占比仅有 17%,人类活动仅在流域的中部尤其是绿

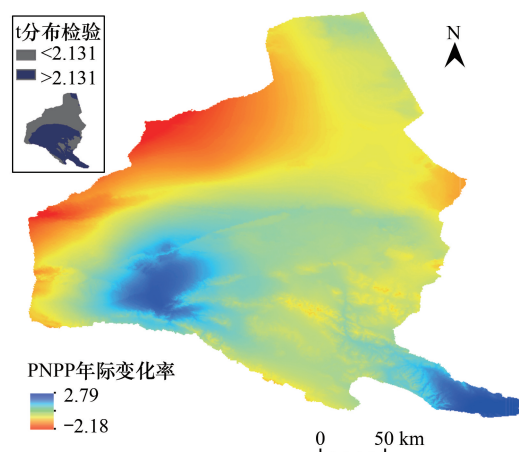


图 3 疏勒河流域 2001—2015 年 PNPP 年际变化率

Fig.3 Changing rate of PNPP over Shule River basin during 2001—2015

PNPP:潜在净初级生产力 Potential net primary productivity

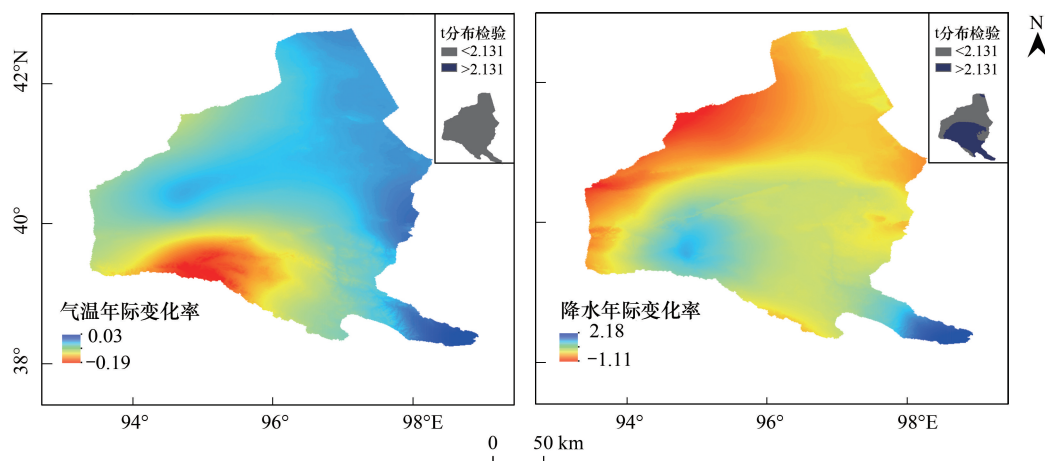


图 4 疏勒河流域 2001—2015 年年均温年际变化率和年总降水年际变化率

Fig.4 Changing rate of average temperature and annual total precipitation over Shule River basin during 2001—2015

洲区对植被恢复起到促进作用。为了进一步的分析 HNPP 变化规律,将 HNPP 的正负与 HNPP 变化的趋势结合起来,归类得到负负、负正、正负与正正 4 种结果(图 6)。其中 HNPP 呈负负的情形分布范围最小,主要集中于绿洲及敦煌的西部,显示人类活动导致植被退化的作用减弱;呈负正情形的 HNPP 主要分布于敦煌的大部,瓜州玉门绿洲周围及流域东北边缘,人类活动导致植被退化的作用增强;呈正负情形的 HNPP 分布范围最广,占总面积的 43.24%,主要集中于流域上游山区、瓜州北部、敦煌北部及北肃北,人类活动促进植被恢复的作用减弱;呈正正情形的 HNPP 主要分布于疏勒河干流上游和中下游山前荒漠过渡带,在党河上游,玉门瓜州绿洲北部及北肃北也有大量分布,这些区域人类活动促进植被恢复的作用增强。综合来看,人类活动在灌溉绿洲表现为负向作用,植被被破坏。而在肃北、阿克塞,从 2003 年开始,均被列为国家生态保护项目——“退牧还草”工程项目的试点县,禁牧封育实施后流域植被得到逐步的恢复,并取得了较为显著的生态效益^[35],表现为人类活动对植被的修复作用。

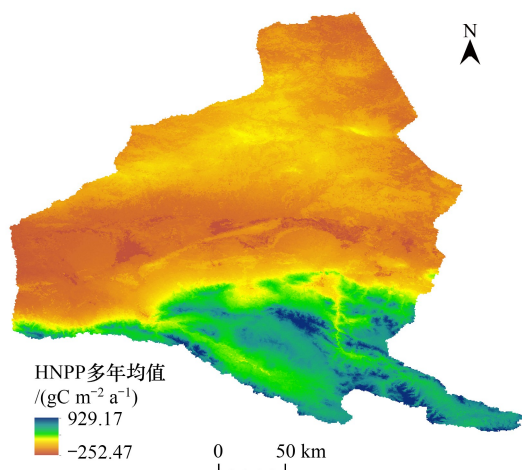


图 5 疏勒河流域 2001—2015 年均 HNPP 空间分布

Fig.5 Spatial distribution of mean annual HNPP over Shule River basin during 2001–2015

HNPP: 人类活动影响的净初级生产力 Human net primary productivity

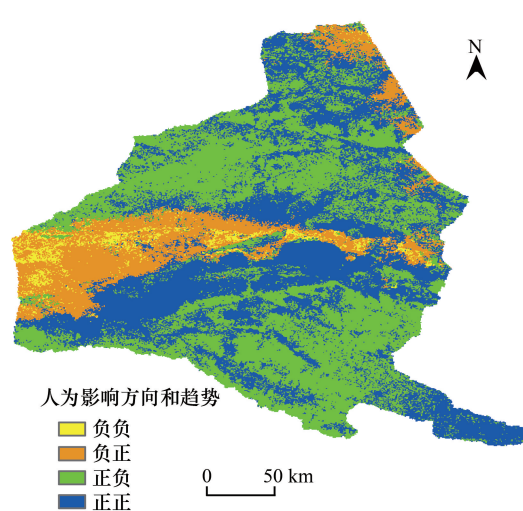


图 6 NPP 人为影响方向与趋势

Fig.6 Distribution of NPP's direction and trend

负负:表示人为负向影响且影响程度逐渐减弱;负正:表示人为负向影响且影响程度逐渐增强;正负:表示人为正向影响且影响程度逐渐减弱;正正:表示人为正向影响且影响程度逐渐增强

3.5 气候变化和人类活动对植被变化的相对作用

根据表 2 列出的方法评估气候变化和人类活动在植被改善中的相对作用。在植被恢复区两个因素的相对作用表现出明显的空间异质性(图 7),其中,人类活动对植被改善起主要作用(即相对作用超过 50%)的区域占植被恢复区面积的 77.44%,分布范围主要包括党河上游及玉门南部,瓜州和北肃北大部分区域;而气候变化相对作用超过 50%的区域仅占植被恢复区面积的 22.56%,主要分布在阿克塞、南肃北、敦煌交界处及敦煌和瓜州的一小部分区域。这表明在整个流域,相对于气候变化而言,人类活动对植被的恢复和改善起主要作用^[40]。

根据表 2 中植被退化区情景的计算方法,得到气候变化和人类活动在疏勒河流域植被退化区域的相对作用(图 8)。气候变化引起退化的区域仅占 11.55%,主要分布于敦煌西部和北部、瓜州北部以及北肃北南部,而其余占退化总面积 88.45%的区域均为人类活动主导植被退化。这表明相对于气候变化,人类活动是疏勒河流域植被退化的主要驱动因素。

由此看来,人类活动在流域北部地区的植被恢复以及中部地区的退化中发挥了关键作用。然而,气候变化控制流域西南部地区的植被恢复,以及极少部分地区的土地退化。综合来看,在疏勒河流域人类活动是主导其植被变化的主要因素。

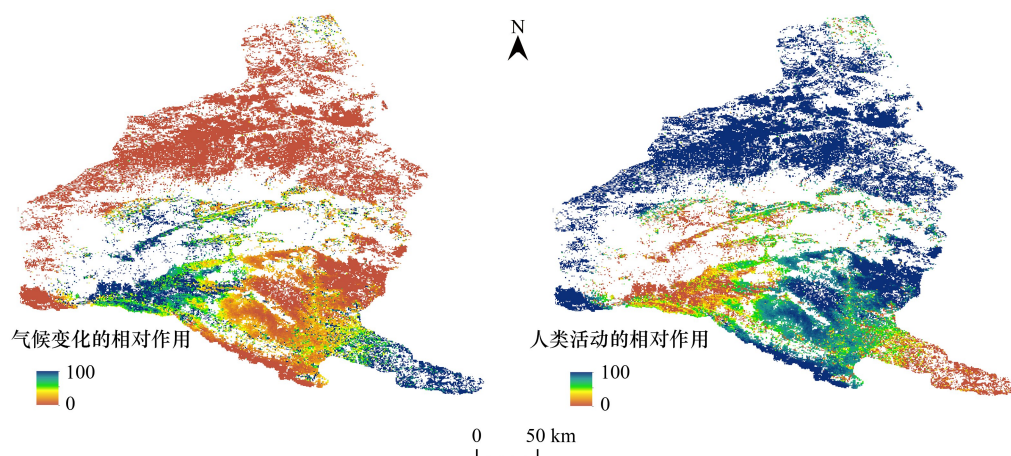


图 7 2001—2015 年疏勒河流域气候变化和人类活动在植被改善区域的相对作用

Fig.7 The relative effects of human activities and climate factors in the areas with improved vegetation in the Shule River Basin during the period of 2001—2015

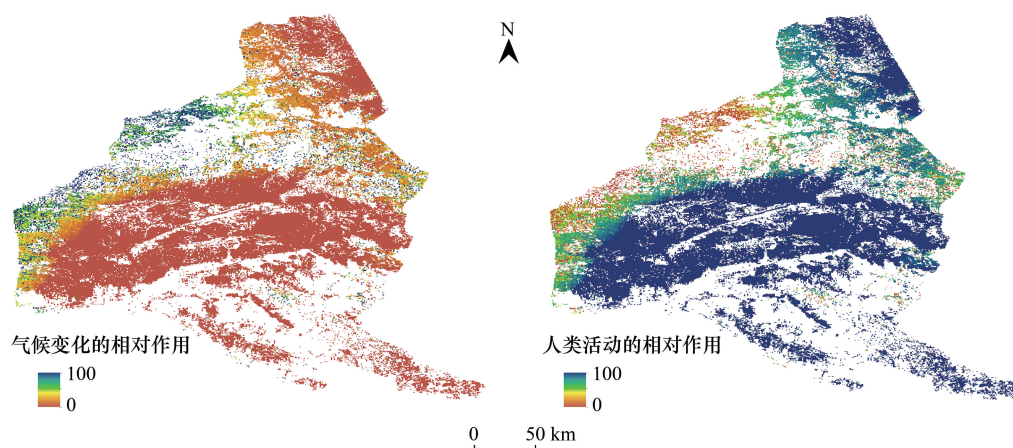


图 8 2001—2015 年疏勒河流域气候变化和人类活动在植被退化区域的相对作用

Fig.8 The relative effects of human activities and climate factors in the areas with degenerated vegetation in the Shule River Basin during the period of 2001—2015

4 结论

疏勒河流域由于地形、地貌、气候以及水资源等环境因素的影响,特别是近年来受气候变化与人类活动的深入影响,NPP 空间分布异质性高,厘清气候变化和人类活动对 NPP 的作用对流域资源管理和流域可持续发展具有重要意义。

ANPP 和 PNPP 求差法可以在空间上定量区分人类活动和气候变化对 NPP 造成的影响,已被广泛用于识别人类引起的植被退化的研究^[41-42]。在栅格尺度上,本文通过使用三种常用 NPP 模型分析 ANPP,PNPP 和 HNPP 的变化趋势,定量区分人类活动和气候变化对 NPP 造成的影响,并确定了疏勒河流域气候变化和人类活动对植被退化和恢复的相对贡献,得出以下结论:2001—2015 年疏勒河流域多年平均 ANPP 主要在 50—100 gC m⁻² a⁻¹ 之间,相对于全国和西北地区普遍较低,生产力水平不高。流域年 ANPP 空间分布呈现南高北低,区域性分布特征明显,即上游的祁连山区和中下游的绿洲区 ANPP 较高,其余荒漠戈壁区 ANPP 较低。流域年 ANPP 呈缓慢增加趋势,且增加的趋势要强于减小的趋势;PNPP 的变化趋势表明,气候变化在该流域

55%的区域有利于植被恢复;HNPP 的空间分布表明,2001—2015 年期间全流域 83%的区域,由人类活动造成的 NPP 损失在增加。气候变化和人类活动在植被改善和退化中的相对作用表现出明显的空间异质性,且相对于气候变化,人类活动是疏勒河流域植被改善和退化的主要驱动因素。

本文利用 PNPP 与 ANPP 求差法定量评价了疏勒河流域气候变化和人类活动对植被变化的影响,该方法适用性较高,可为生态环境恢复和重建提供决策支持。此外,为了进一步全面和精确地分离气候变化和人类活动对流域植被的影响,需要更多的气象和植被生物量等实测数据。

参考文献 (References):

- [1] Wang H, Li X B, Long H L, Gai Y Q, Wei D D. Monitoring the effects of land use and cover changes on net primary production: a case study in China's Yongding River basin. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(12): 2654-2665.
- [2] Lieth H, Whittaker R H. *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer Verlag, 1975.
- [3] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D3): 5263-5283.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 郝永萍, 陈育峰, 张兴有. 植被净初级生产力模型估算及其对气候变化的响应研究进展. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 564-571.
- [7] Potter C, Klooster S, Myneni R, Genovese V, Tan P N, Kumar V. Continental-scale comparisons of terrestrial carbon sinks estimated from satellite data and ecosystem modeling 1982-1998. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(3/4): 201-213.
- [8] 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.
- [9] Hicke J A, Asner G P, Randerson J T, Tucker C, Los S, Birdsey R, Jenkins J C, Field C. Trends in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982-1998. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(2): 1018.
- [10] 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.
- [11] Tang C J, Fu X Y, Jiang D, Fu J Y, Zhang X Y, Zhou S. Simulating spatiotemporal dynamics of sichuan grassland net primary productivity using the CASA model and in situ observations. *Scientific World Journal*, 2014, 2014: 956963.
- [12] Rojstaczer S, Sterling S M, Moore N J. Human appropriation of photosynthesis products. *Science*, 2001, 294(5551): 2549-2552.
- [13] 李传华, 赵军, 师银芳, 胡秀芳. 基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究——以石羊河流域为例. *生态学报*, 2016, 36(13): 4034-4044.
- [14] 许端阳. 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量研究——以鄂尔多斯高原为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [15] 吴艳艳, 吴志峰, 余世孝. 定量评价人类活动对净初级生产力的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2535-2544.
- [16] Zhang C X, Wang X M, Li J C, Hua T. Roles of climate changes and human interventions in land degradation: a case study by net primary productivity analysis in China's Shiyanghe Basin. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(8): 2183-2193.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Zhou W, Yang H, Huang L, Chen C, Lin X S, Hu Z J, Li J L. Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 303-313.
- [20] 张娟, 田文婷, 颜耀文. 疏勒河流域 NPP 时空变化分析. *安徽农业科学*, 2015, 43(25): 227-230, 273-273.
- [21] 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.
- [22] 魏靖琼, 柳小妮, 任正超, 王红霞, 潘冬荣. 基于 CASA 模型的甘肃省草地净初级生产力研究. *草原与草坪*, 2012, 32(4): 8-14, 19-19.
- [23] 刘春雨, 董晓峰, 刘英英, 潘竟虎, 车彦军. 甘肃省净初级生产力时空变化特征. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 163-170.
- [24] 卞鸿雁, 庞奖励, 任志远, 文雯. 干旱区内陆流域净初级生产力时空分异模拟及自然因素分析——以泾河流域为例. *资源科学*, 2012, 34

(9): 1790-1797.

- [25] 潘竞虎, 李真. 2001—2012 年西北干旱区植被净初级生产力时空变化. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3333-3340.
- [26] 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.
- [27] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608.
- [28] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [29] 陈正华, 麻清源, 王建, 祁元, 李净, 黄春林, 马明国, 杨国靖. 利用 CASA 模型估算黑河流域净第一性生产力. 自然资源学报, 2008, 23(2): 263-273.
- [30] 包刚. 基于 MODIS 数据的内蒙古陆地植被净第一性生产力遥感估算研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2009.
- [31] 冉慧. 基于 CASA 模型的吉林省区域 NPP 遥感研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [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] Palmer W C. Meteorological Drought. Washington, DC: U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [34] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, Kicklighter D W, Steudler P A, Peterson B J, Grace A L, Moore III B, Vorosmarty C J. Potential net primary productivity in South America: application of a global model. Ecological Applications, 1991, 1(4): 399-429.
- [35] 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.
- [36] 郭继凯, 吴秀芹, 董贵华, 李延森. 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. 干旱区研究, 2017, 34(3): 621-629.
- [37] 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.
- [38] 齐敬辉, 牛叔文, 马利邦, 何红. 2000—2014 年疏勒河流域植被覆盖时空变化. 生态与农村环境学报, 2016, 32(5): 757-766.
- [39] Zhang X Y, Wang X M, Yan P. Re-evaluating the impacts of human activity and environmental change on desertification in the Minqin Oasis, China. Environmental Geology, 2008, 55(4): 705-715.
- [40] 李文卿, 胡自治, 龙瑞军, 高新才, 李发弟. 甘肃省退牧还草工程实施绩效、存在问题和对策. 草业科学, 2007, 24(1): 1-6.
- [41] Cardoch L, Day Jr J W, Ibáñez C. Net primary productivity as an indicator of sustainability in the Ebro and Mississippi deltas. Ecological Applications, 2002, 12(4): 1044-1055.
- [42] Zika M, Erb K H. The global loss of net primary production resulting from human-induced soil degradation in drylands. Ecological Economics, 2009, 69(2): 310-318.