

文章编号: 1008-2786-(2018)4-644-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000360

基于 MODIS-NDVI 数据的植被碳汇空间格局研究 ——以石羊河流域为例

负银娟, 赵 军*

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 本文以石羊河流域地表植被为研究对象, 利用遥感影像数据、气象资料数据、DEM 数据和土地利用数据, 通过修正的 CASA 模型和土壤微生物呼吸模型计算石羊河流域生态系统 NEP。在此基础上定量地划分出碳源、高碳汇区和低碳汇区, 并对流域内碳源/汇空间分布进行详细研究。结果表明: 石羊河流域净生态系统生产力 (NEP) 空间分布表现出由西南向东北逐渐递减的趋势, 整体呈现出南高北低、高低相间的分布特征。研究区碳源/汇空间分布大体呈现条带状分布格局, 碳源主要分布于下游民勤绿洲周边的沙漠区, 低碳汇区主要分布于中游河西走廊平原, 高碳汇区主要分布于上游祁连山区。由于光照等因子的差异, 高碳汇区主要分布于阴坡其次是半阳坡和半阴坡, 阳坡分布最少, 低碳汇区主要分布于阴坡和半阳坡地区。研究结果能够较好地反映出石羊河流域植被生长及分布状况。

关键词: MODIS-NDVI; 碳汇; NEP; CASA 模型; 石羊河流域

中图分类号: Q148; Q948

文献标志码: A

IPCC 第五次评估报告 (<http://www.ipcc.ch/>) 指出: 2012 年全球大气 CO₂ 浓度为 393.1 ppm, 比工业化前增加了 41%^[1]。CO₂ 浓度的持续升高导致全球平均气温不断上升, 继而引发一系列的环境问题严重影响人类的生存和发展^[2-4]。陆地生态系统碳循环是全球碳循环的重要组成部分^[2]。它通过植被的光合作用将大气中的 CO₂ 固定为有机化合物^[5], 是人类生产、生活中最基本的能量来源, 且最易受到气候变化和人类活动的影响^[2,5]。当生态系统固定的碳量大于排放的碳量时该系统就成为大气 CO₂ 的汇简称碳汇 (Carbon Sink)^[6], 反之则为碳源 (Carbon Source)^[6]。1960 年由国际科学联合会 (ICSU) 发起的国际生物学计划 (IBP) 标志着全球陆地森林生态系统碳循环研究的开端^[2,7-8]。此后,

各个国家也陆续开始了区域性碳循环的研究^[2,7-15]。Pacala 和 Janssens 等通过研究发现陆地生态系统能够吸收部分工业生产所排放的 CO₂^[9-10]。1980 年, Delcourt 等利用资源清查资料研究了美国东南部森林的碳收支情况, 结果表明, 美国东南部森林每年净吸收的大气 CO₂ 约为 $0.07 \times 10^{15} \text{ TgC}^{[11]}$ 。90 年代中期, Dixon^[12] 和 Wofsy 等^[13] 通过调查搜集大量地面实测数据, 探讨了大尺度范围的森林碳汇在全球碳循环中的作用^[7,12-13]。到了 1970 年我国才开始了有关碳源碳汇方面的研究^[7]。方精云等通过研究测定 CO₂ 通量, 得出了北半球陆地生态系统是一个重要的碳汇区^[6-7,14,16]。

近年来, 我国研究者通过利用光能利用率 CASA 模型和土壤微生物呼吸模型分别研究了中国

收稿日期 (Received date): 2017-09-16; 改回日期 (Accepted date): 2018-04-22

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41661084) [National Natural Science Foundation of China (41661084)]

作者简介 (Biography): 负银娟 (1991-), 女, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 环境遥感与 GIS 应用。[YUN Yinjuan (1991-), female, born in Xianyang, Shaanxi province, M. Sc. candidate, research on environmental remote sensing and GIS application] E-mail: 1114142343@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 赵军 (1963-), 男, 山西河津人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 资源环境遥感与 GIS 应用。[ZHAO Jun (1963-), male, born in Hejin, Shanxi province, Ph. D., professor, specialized in environmental remote sensing and GIS application] E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

陆地、西北干旱区和省域生态系统碳汇量,都取得了较为可观的研究成果^[2,7,14-15]。纵观国内外植被碳汇研究,大多数都集中在大尺度范围的森林和草原生态系统^[2],缺少对小尺度范围流域生态系统碳汇的综合研究,研究对象较为单一,且大多数研究都只是估算出了植被净生态系统生产力(Net Ecosystem Productive,NEP),简单地从总量上确定生态系统是否为碳汇,少有研究能够在空间上定量的划分出生态系统的碳汇区,并对其碳汇能力的大小进行区分,使得研究的实用性大大降低。因此,本文从生态系统碳汇区的定量划分入手,分析其碳汇能力的大小,并对其空间分布特征进行详细研究。

石羊河流域是我国西北干旱地区一个典型的内陆河流域^[17-20]。同时也是我国内陆河流域中人口最稠密生态环境破坏最严重的流域之一^[19]。由于流域深居大陆腹地降水少蒸发强气候干旱^[20],加之近几十年来人类活动对水资源的过度开发利用^[20],使得流域内自然生态环境持续恶化,严重威胁着流域的可持续发展^[18]。植被是生态系统存在的基础,也是生态环境变化的综合指示器^[21]。因此,对流域内植被碳汇区进行定量划分,研究其空间分布特征,这对了解石羊河流域生态系统的变化有着重要的现实意义^[22],对正确评价石羊河流域生态系统的发展和生态环境保护有科学指导意义^[22]。基于以上原因,本文以遥感数据、气象数据及土地利用数据为基础,利用 CASA 模型和土壤微生物呼吸方程,对石羊河流域生态系统植被碳汇量进行估算,在此基础上进一步寻找合理的阈值,划分出合适的植被碳汇区,并分析其空间分布特征,以期为石羊河流域生态环境的保护和治理提供良好的决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石羊河流域地处甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓^[17],东以乌峭岭、毛毛山、老虎山为界^[17],西以大黄山—马营滩为界^[17]。地理位置介于东经 101°22′~104°16′北纬 36°29′~39°27′之间^[23](图 1),流域总面积约为 4.16 万平方公里^[23],属河西走廊三大内陆河流域之一^[24]。流域行政区划包括武威市的古浪县、凉州区、民勤县全部及天祝县部分地区、金昌市的永昌县及金川区全部及张掖市肃南裕固族自治县,共 3 市 7 县(区)^[24]。全流域地势南高北低,自西南向东北倾斜^[23]。流域深居大陆腹地,属

大陆性温带干旱气候^[25-26],气候特点表现为太阳辐射强、昼夜温差大、降水少、蒸发强烈(表 1)、空气干燥^[25-26]。受气候、水文和地形等自然条件的影响,流域内植被和土壤类型的分布形成了明显的土壤—植被垂直带谱^[25-26]。

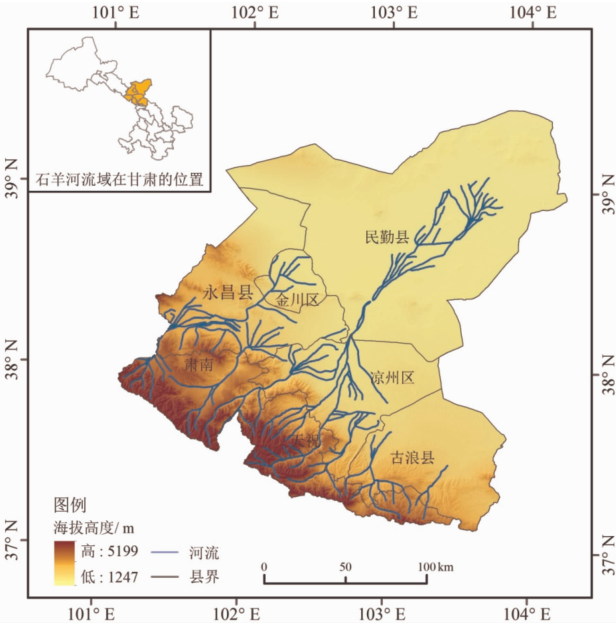


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of Shiyang river basin

表 1 石羊河流域上、中、下游年均降水量与年均蒸发量

Tab. 1 Average annual precipitation and evaporation of Shiyang river basin

石羊河流域	年均降水量/mm	年均蒸发量/mm
上游	386	1670
中游	160	2020
下游	113	2644

1.2 数据来源与处理

本研究采用的主要数据有 2010 年石羊河流域 MODIS-NDVI(归一化差异植被指数)数据、气象数据、土地利用数据和数字高程模型数据。NDVI 数据来自 LADDS 网站,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 天,时间序列为 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日^[27]。在 MRT 和 ArcGIS10.1 中对 NDVI 数据进行投影转换、拼接、裁剪、去空值、最大值合成和标准化等处理得到 2010 年逐月的标准化 NDVI 数据。气象数据主要有月平均气温、月总降水量和日照百分率等数据,来自中国气象科学数据共享服务网,气温数据采用“回归+残差 IDW”法进

行插值^[7],降水数据和日照百分率数据分别采用“普通克里金”和“反距离加权”法进行插值^[7,28]。为保证空间插值精度,共选取研究区内及周边 17 个气象站^[2]。DEM 使用 90 m 分辨率的 STRM 数据产品,来自地理空间数据云。土地利用数据来自“干旱区内陆河流域城镇—水—土地利用的空间耦合关系研究——以石羊河流域为例”国家自然科学基金项目成果。最后对所有数据在 ArcGIS10.1 中进行重采样,将分辨率统一为 250 m,数据采用 Albers Conical Equal Area 投影、GCS_WGS_1984 地理坐标系。

1.3 植被碳汇量估算

生态系统碳汇储量包含了植物之间生物量、凋落物生物量及土壤有机质呼吸量^[2,15]。净生态系统生产力(NEP)通常被定义为生态系统内植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)与土壤微生物呼吸碳排放(Heterotrophic Respiration, R_H)之差^[15-16,29]。其表示了陆地和大气生态系统的碳交换率^[30-31],是区域上碳平衡估算的重要指标,常常作为碳汇大小的度量^[30-32]。公式如下:

$$NEP = NPP - R_H \quad (1)$$

式中, NEP 表示植被净生态系统生产力^[7,30-32], NPP 表示植被净初级生产力^[7,30-32], R_H 表示土壤微生物呼吸量^[2,7,31]。

1.3.1 NPP 的估算

目前使用最多的 NPP 估算模型为改进的光能利用率 CASA 模型,表达式为^[33]:

$$NPP(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \times T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon_{max} \quad (2)$$

$$FPAR(x, t) = \begin{cases} 0 & NDVI \leq 0.075 \\ \min\{1.16 \times NDVI(x, t) - 0.0439, 0.9\} & NDVI > 0.075 \end{cases} \quad (3)$$

$$W_e(x, t) = 0.5 + 0.5 \times E(x, t) / E_p(x, t) \quad (4)$$

式中, $SOL(x, t)$ 表示太阳总辐射^[15,33],本文采用和清华^[28]以天文辐射为起始值建立的西部公式来计算获得。 $FPAR(x, t)$ 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例^[15,33]。 $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ 表示低温和高温对光利用率的胁迫作用^[15,33]。 $W_e(x, t)$ 为水分胁迫影响系数^[15,33]。 ε_{max} 是理想条件下的最大光能利用率^[15,33]。 $E(x, t)$ 为区域实际蒸散量,可根据周广胜^[34]建立的区域实际蒸散模型求取^[37]。 $E_p(x, t)$ 为区域潜在蒸散量,可根据 Penman 公式^[35-36]

求取。

1.3.2 土壤微生物呼吸量 R_H 的估算

前人在对土壤微生物呼吸量进行估算时,主要用到两种模型,机理模型和经验模型^[15]。裴志永等详细探讨过青海省五道梁实验点上碳排放与环境因子的关系,建立了温度、降水与碳排放的回归方程^[16,32]。潘竟虎^[2]、刘春雨^[15]等分别将其应用于中国西北干旱区植被碳汇估算和甘肃省碳汇估算中,且都取得了较为可观的研究成果。本文采用既得的研究成果^[2,6,7,15,16,32]估测石羊河流域土壤微生物呼吸的分布状况,计算公式如下^[32]:

$$R_H = 0.22 \times [\text{Exp}(0.0913T) + \text{Ln}(0.3145R + 1)] \times 30 \times 46.5\% \quad (5)$$

式中, R_H 表示土壤微生物呼吸^[32], T 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$), R 为月总降水量(mm)。

1.4 NPP 估算模型精度评价

NPP 估算结果的精度评价一直是 NPP 遥感估算的难题和最具争议的环节^[2,33]。NPP 估算模型精度评价时一般是与实测数据或其他模型估算的结果或遥感数据产品进行对比^[2,33]。由于 NPP 实测数据获取较为困难,且 MODIS NPP 产品已在全球碳循环研究中得到广泛应用^[7],故本文将估算结果(图 2)与 MODIS NPP 年产品进行对比。总体来看,NPP 的空间分布趋势符合石羊河流域的实际境况,本文 NPP 估算值与 NPP 产品值比较接近,两者的平均值相差 $43 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (本文估算的平均值为 $147.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,范围为 $0 \sim 878 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;NPP 产品的平均值为 $104.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,范围为 $0 \sim 837 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均相对误差^[40]为 7.1%。估

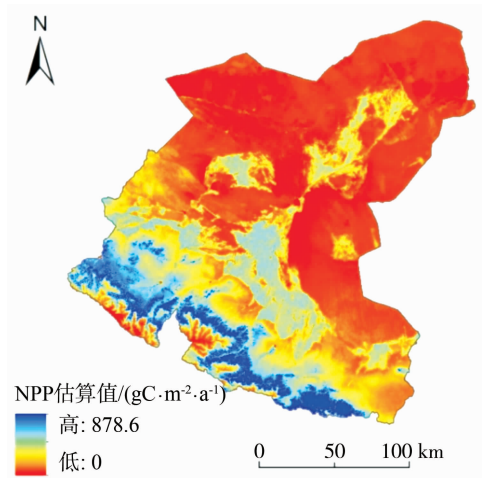


图 2 NPP 估算值空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of NPP estimation

算值所得到的总体标准差(166.9)高于产品值的标准差(123.5),说明估算值的波动范围大于产品值。然后在 Arcmap 中将 NPP 模型估算图重采样至 1 km 分辨率,再在模型估算图与 MODIS NPP 数据产品中均匀随机抽取 100 个样本点,对模拟值和数据产品进行相关性分析(图 3),由图 3 可知,模拟值与数据产品之间具有较高的相关性,相关系数 $R=0.89$ (通过了置信水平 $P=0.001$ 的显著性检验,达到了极显著水平),说明两者在空间上的变化趋势是一致的。

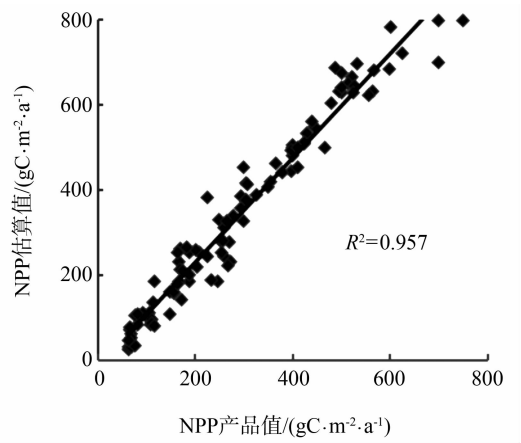


图 3 NPP 估算值与 MODIS NPP 产品的比较
Fig. 3 Comparison between estimated NPP and MODIS NPP

最后将本文 NPP 估算结果与甘肃省其他研究成果进行对比(表 2),发现本文估算值普遍小于其他研究成果,这是因为其他研究区中包含甘肃省的陇南地区,而该区域植被生长旺盛覆盖度高,所以 NPP 估算值较大。但本文 NPP 估算结果与其他研究成果在空间分布上都较为吻合。说明本研究估算的 NPP 数据具有一定的可信度,可以作为研究区植被碳汇量计算的基本数据。

表 2 NPP 估算结果与其他研究结果的对比

Tab. 2 Comparison between estimated NPP and other research results	
估算值/($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	参考文献
0 ~ 945	[15]
0 ~ 1000	[38]
2.4 ~ 912	[2]
0 ~ 878.6	本研究

2 结果与分析

2.1 NEP 空间分布及月变化特征

利用公式(1)计算得到 2010 年石羊河流域植

被净生态系统生产力(NEP),图 4 为石羊河流域 NEP 空间分布图。由图可见,石羊河流域 NEP 空间分布状况表现出由西南向东北逐渐递减的趋势,武威以北的沙漠地区 NEP 偏低,大部分地区低于 $-100 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,武威以南的祁连山区 NEP 较高,大部分地区高于 $100 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。NEP 最低的地区主要分布在民勤绿洲旁边的巴丹吉林和腾格里两大沙漠区,NEP 最高的地区主要集中在冷龙岭及毛毛山等山区。整体呈现出南高北低、高低相间的分布特征。

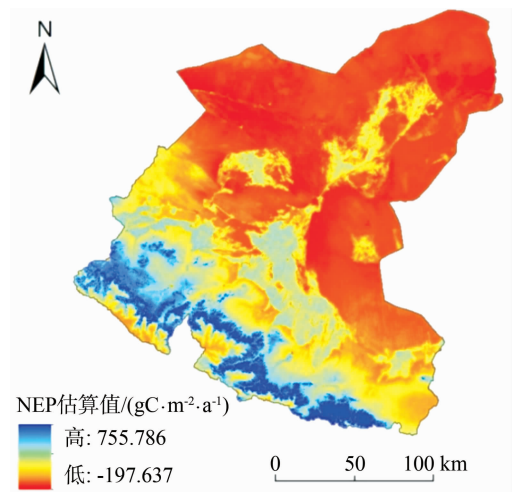


图 4 NEP 估算值空间分布图
Fig. 4 Spatial distribution of estimated NEP

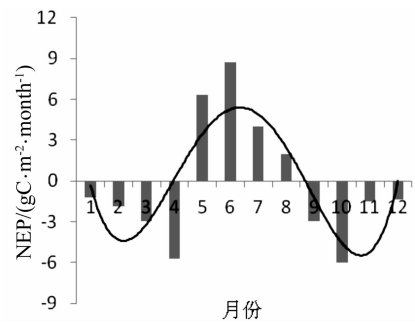


图 5 月均 NEP 分布图
Fig. 5 Distribution of monthly average NEP

从月均 NEP 分布图(图 5)中可以看出,1—12 NEP 月均值大体呈现出先减少后增加再减少的变化趋势,该趋势与研究区自然植被和农作物的生长规律表现一致。3—4 月,随着气温逐渐回升,降水逐渐增加,植物开始萌芽,但此时植物的固碳能力还明显低于土壤呼吸速度,所以此时的 NEP 较低。5—8 月,气温大幅回升降水迅速增加,在这种条件下植被的水热耦合作用达到了最佳组合,是植被生长的最佳时期^[15]。此时 NEP 快速累积,最大值出

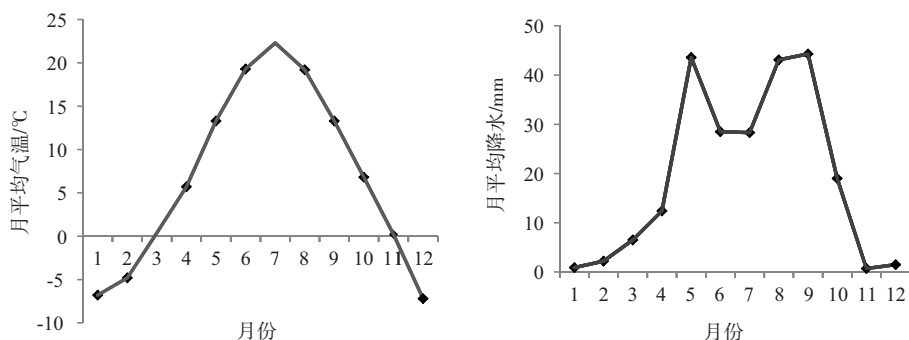


图6 月均气温和月均降水量分布图

Fig. 6 Distribution curve of monthly average temperature and precipitation

现在6月。9—10月,气温回落,降水减少,自然植被生长缓慢,且绝大多数农作物都已收割,而此时的土壤呼吸速率依然较高,所以NEP急速降低。12—2月为一年中气温最低时期,植被处于枯萎期,固碳能力较低,由于低温和缺水此时的土壤呼吸速率也较低,所以NEP都比较低(图6)。

2.2 植被碳汇区划分

前人在研究中一般都认为当NEP大于0时,生态系统表现为碳汇,反之则为碳源^[6-14]。本文在研究中发现当月均NEP大于0时,研究区每个月的植被碳汇区都是动态变化的,因此将1月至12月月平均NEP空间分布取交集,得到年内固定的植被碳汇区,再用该区域与年总NEP图相交,得到年内固定植被碳汇区的阈值范围。基于此本文对2010年石羊河流域NEP进行详细研究发现,在年总NEP图中,首先,当 $NEP \geq 300 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时,植被碳汇能力非常突出,且该区域在全年每个月中的NEP都大于0,属于固定碳汇区;其次,当 $NEP \geq 300 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时,该区域的土地利用类型几乎全为林地(图7),而森林又是陆地生态系统中最大的碳库^[2]。而且本文通过查阅大量文献发现,在已有研究^[16]中当某地区的 $NEP \geq 300 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时,就认为该区域的植被碳汇能力大,属于高碳汇区。因此,在已有研究的基础上结合本研究区的实际情况,本文对NEP进行重新分类,即当 $NEP < 0$ 时,表示碳源,因为碳源的影响因子比较复杂,本文暂时不予研究,还是按照前人的定义来划分;当 $0 \leq NEP < 300 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时,表示低碳汇区;当 $NEP \geq 300 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时,表示高碳汇区。

2.3 石羊河流域碳源/汇空间分布特征

2.3.1 碳源/汇整体分布特征

应用2.2中提出的阈值对NEP进行分类,得到2010年石羊河流域碳源碳/汇空间分布图(图8),

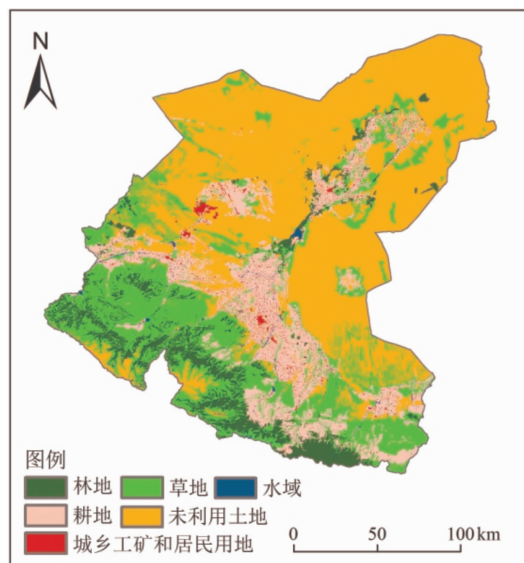


图7 土地利用类型图

Fig. 7 Land use types map

整体而言,石羊河流域碳源/汇空间分布比较简单,大体呈现条带状的分布格局。碳源主要分布于下游民勤绿洲周边的沙漠区,低碳汇区主要分布于中游河西走廊平原,高碳汇区主要分布于上游祁连山区,整体表现出明显的垂直地带性特征^[20]和一定的纬度地带性特征(图9)。

下游民勤地区降水稀少、蒸发强烈、太阳辐射强,该区域风沙地貌明显,土壤类型主要为灰棕漠土,鲜少有自然植被生长,呈现荒漠化景观,大部分地区属于碳源,有少量低碳汇区分布于民勤绿洲农业区;中游河西走廊平原区,日照充足,降水相对较少而蒸发强烈,该区域地形平坦,土壤肥沃,是主要的绿洲农业灌溉区,自然植被类型为荒漠化草原和干旱草原植被,大部分区域属于低碳汇区,也有部分碳源区分布于凉州区周边的沙漠区;上游南部祁连山区,属于高寒半干旱半湿润气候,降水较多,温度

较低,蒸发较大,是整个流域植被生长最好的地区,也是草地和林地的主要集中地,大部分地区属于高碳汇区,也有少量碳源区分布于祁连山冰川区,由于冰川区日微气象变化大^[39]、海拔高且温度常年为负值,致使该区域少有自然植被分布,故属于碳源。

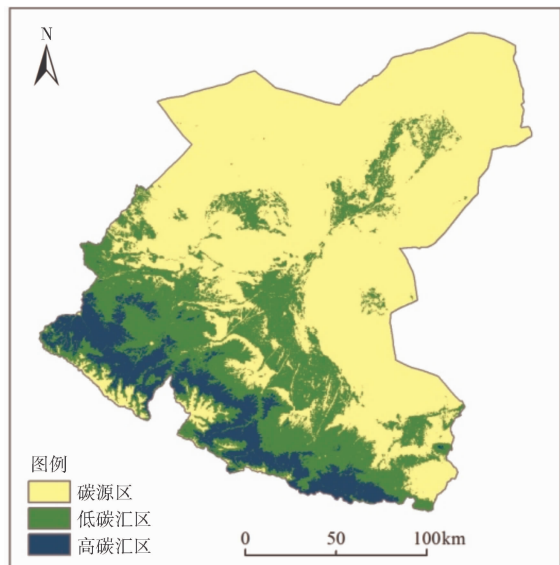


图8 碳源/汇空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of carbon source/sink

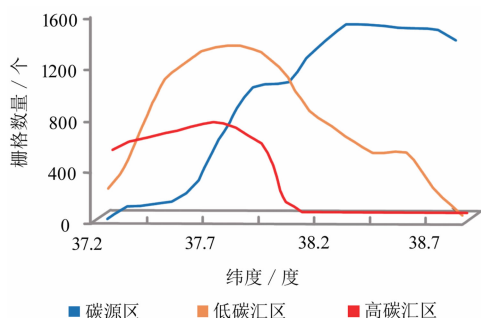


图9 碳源/汇分布随纬度的变化图

Fig. 9 Variation of carbon source/sink distribution with latitude

2.3.2 不同地形因子上植被碳汇空间分布

(1) 不同海拔高度碳源/汇空间分布变化分析

将研究区 DEM 按照自然地理中的划分标准进行分级,然后与石羊河流域碳源/汇空间分布图进行叠加,得到各海拔高度范围内碳源/汇栅格数量,并作碳源/汇随海拔高度变化直方图(图 10)。由图可得,碳源/汇空间分布差异与海拔高度变化呈线性关系。流域内碳源主要分布于 1246 ~ 1500 m 的中海拔地区,随着海拔高度增加,碳源面积逐渐减少;碳汇主要分布于 1500 ~ 3500 m 的高海拔地区,随着海拔的升高,碳汇面积表现出先增加后减少的变化趋

势。这种趋势与研究区地貌特征有密切的联系:从 1246 到 3500 m 研究区地貌类型从荒漠、低山丘陵经由平原向山地演变,同时,随着海拔上升人类活动减少、气温降低、降水量增加、蒸发量减少,植被生长旺盛覆盖度高,碳源面积减少,碳汇面积增大;而 3500 ~ 5199 m 属于超高海拔范围,随着海拔升高气温进一步降低降水减少,植被生长主要受低温抑制出现林地向寒漠的过渡^[22],此时碳汇面积逐渐减少。

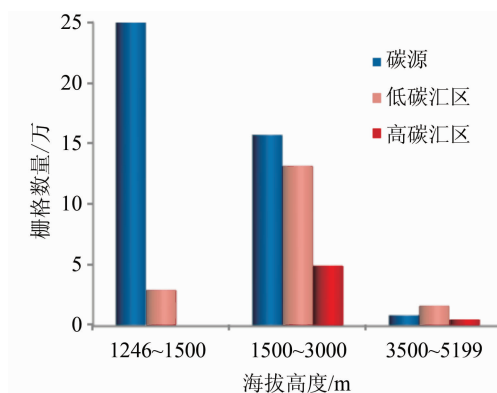


图10 碳源/汇空间分布随海拔高度变化直方图

Fig. 10 Spatial distribution of carbon sources/sinks as a function of altitudes

(2) 不同坡度碳源/汇空间分布变化分析

在 ArcMap 中利用研究区 DEM 影像生成坡度图,并依据国际地理学联合会对坡度等级的划分进行分级,然后与研究区碳源/汇空间分布图进行叠加,得到各坡度等级范围内碳源/汇栅格数量,并作碳源/汇随坡度变化直方图(图 11)。由图可得,碳源主要分布在平原($0^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$)和微斜坡($0.5^{\circ} \sim 2^{\circ}$)地区,碳汇主要分布在斜坡($5^{\circ} \sim 15^{\circ}$)地区。因为平原和微斜坡地区沙漠和居民用地占绝大部分区域,沙漠地区由于降水稀少土壤贫瘠,自身不利于植被生长,再加上人类活动频繁进一步导致自然植被退化,使得碳源面积大大增加;随着坡度增大,人类活动减少,此时出现山地荒漠草原向针叶林地的过渡,碳汇面积达到最大;陡坡($15^{\circ} \sim 35^{\circ}$)和峭坡($35^{\circ} \sim 45^{\circ}$)地区,由于地形陡峭水土流失严重,气温过低不利于植被生长,因此碳汇面积逐渐减少。

(3) 不同坡向碳源/汇空间分布变化分析

在 ArcMap 软件中利用流域 DEM 影像生成坡向图,按照自然地理中的定义将坡向分为 5 类: -1° 表示平地、 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 和 $315^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 为阴坡、 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 表示半阳坡、 $135^{\circ} \sim 225^{\circ}$ 为阳坡、 $225^{\circ} \sim 315^{\circ}$ 表示半阴坡。然后与研究区碳源/汇空间分布图进行叠加,

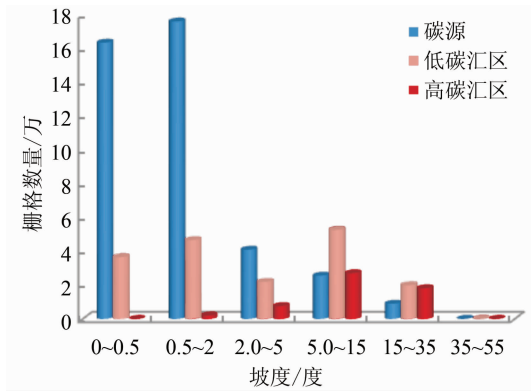


图 11 碳源/汇分布随坡度变化直方图

Fig. 11 Spatial distribution of carbon sources/sinks as a function of slopes

得到各坡向等级范围内碳源/汇栅格数量,并作碳源/汇随坡向变化直方图(图 12)。由图可得,高碳汇区主要分布于阴坡地区其次是半阳坡和半阴坡,阳坡分布最少,低碳汇区主要分布于阴坡和半阳坡地区。因为在干旱地区,水分是影响植被生长的关键因子,由于阴坡日照少,温度低,蒸发量小,土壤湿度比较大,因此植被生长旺盛,而阳坡太阳辐射强,土壤水分蒸发强烈,较为干旱,不利于植被生长;碳源主要分布于阴坡和半阳坡地区,主要因为研究区中存在大面积的沙漠,沙漠地区坡向较小,大部分介于 $0^\circ \sim 135^\circ$,属于阴坡和半阳坡范围,而沙漠地区鲜少有植被生长,属于碳源,故碳源主要分布于阴坡和半阳坡地区。

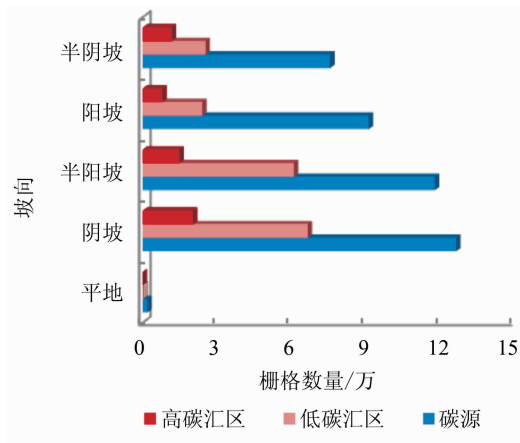


图 12 碳源/汇分布随坡向变化直方图

Fig. 12 Spatial distribution of carbon sources/sinks as a function of aspects

2.3.3 不同植被类型碳源/汇空间分布变化分析

由石羊河流域植被类型图可知研究区植被类型主要有针叶林、阔叶林、灌木林地、草原、农田和荒

漠。由于针叶林和阔叶林总体面积较小,为了便于研究将针叶林、阔叶林和灌木林地都归为森林。将研究区植被类型图与碳源/汇空间分布图进行叠加,得到 2010 年不同植被类型的碳源/汇栅格数量,并作碳源/汇随植被类型变化图(图 13)。由图可得,高碳汇区的植被类型主要为森林和草原,低碳汇区的植被类型主要为农田和草原,碳源区的植被类型主要是荒漠。因为荒漠土壤常年贫瘠,少有植被分布,呈现荒漠化景观,植被碳汇量为负值,因此属于碳源。受气候、水文和地形等自然条件影响,石羊河流域农作物生长期一般为 3—11 月,在此期间农田的植被覆盖度较高,碳汇量较大,而 12—2 月属于耕地休整期,此时植被碳汇量为负值,因此以全年为计量单位,农田的植被碳汇量较少,故属于低碳汇区。而林地和部分高覆盖度草原在全年内植被覆盖度都较高,植被碳汇能力较强,碳汇量较大,因此属于高碳汇区。

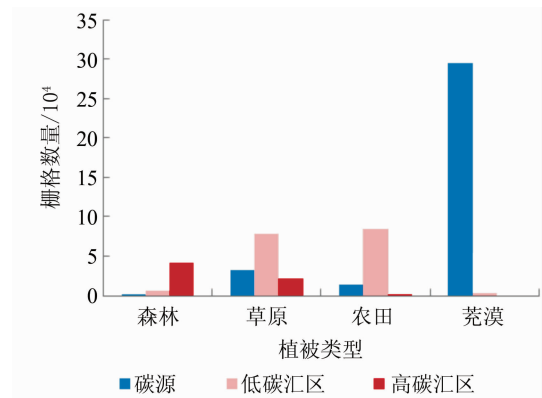


图 13 碳源/汇分布随植被类型变化直方图

Fig. 13 Spatial distribution of carbon sources/sinks as a function of vegetation types

3 讨论与结论

3.1 讨论

在前人研究的基础上,本文通过对 NEP 进行深入研究,定量地划分出了碳源,高碳汇区和低碳汇区,并详细地分析了其在不同要素(高程、坡度和坡向)上的空间分布特征。研究结果较好地反映了石羊河流域植被生长及分布状况^[2],有助于为石羊河流域生态环境的保护和治理提供科学依据。不足的是,生态系统碳源/汇空间分布变化是一个长期、动态的过程^[7],由于数据所限和工作量较大,本研究仅探讨了石羊河流域 2010 年碳源/汇空间分布特征,研究本地区长时间序列的碳源/汇空间分布变化

特征,并分析碳源/汇对各种自然、人文要素的响应是后续工作的重点。

3.2 结论

本文通过对石羊河流域植被碳源/汇空间分布格局进行详细研究。初步得到以下结论:

(1)石羊河流域 NEP 空间分布状况表现出由西南向东北逐渐递减的趋势。NEP 最低的地区主要分布在民勤绿洲旁边的巴丹吉林和腾格里两大沙漠区,NEP 最高的地区主要集中在冷龙岭及毛毛山等山区。整体呈现出南高北低、高低相间的分布特征。

(2)整体而言,石羊河流域碳源/汇的空间分布状况比较简单,大体呈现出条带状的分布格局。碳源主要分布于下游民勤绿洲周边的沙漠区,低碳汇区主要分布于中游河西走廊平原,高碳汇区主要分布于上游祁连山区,整体表现出明显的垂直地带性特征。

(3)石羊河流域碳源/汇的空间分布特征与海拔高度的变化呈线性关系,流域内碳源主要分布于中海拔地区,随着海拔高度的增加,碳源的面积逐渐减少;碳汇主要分布于高海拔地区,随着海拔的升高,碳汇的面积表现出先增加后减少的变化趋势。不同植被类型碳源/汇空间分布特征,流域内高碳汇区的植被类型主要为森林和草原,低碳汇区的植被类型主要为农田和草原,碳源区的植被类型主要是荒漠。

参考文献 (References)

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 2013, **35**(5): 1068 - 1076 [SHEN Yongping, WANG Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(5): 1068 - 1076]
- [2] 潘竞虎,文岩. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局 [J]. 生态学报, 2015, **35**(23): 7718 - 7728 [PAN Jinghu, WEN Yan. Estimation and spatial-temporal characteristics of carbon sink in the arid region of northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(23): 7718 - 7728]
- [3] KING D A. Environment. Climate change science: adapt, mitigate, or ignore? [J]. Science, 2004, **303**(5655): 176 - 177.
- [4] 李莹,高歌,宋连春. IPCC 第五次评估报告对气候变化风险及风险管理的新认知 [J]. 气候变化研究进展, 2014, **10**(4): 260 - 267 [LI Ying, GAO Ge, SONG Lianchun. Understanding of disaster risk and the management associated with climate change in IPCC AR5 [J]. Climate Change Research, 2014, **10**(4): 260 - 267]
- [5] 郭睿. 陆地生态系统碳汇估算相关研究综述 [J]. 北京规划建设, 2011, (2): 27 - 32 [GUO Rui. A review of researches on estimation of carbon sinks in terrestrial ecosystems [J]. Beijing Planning and Construction, 2011, (2): 27 - 32]
- [6] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981 ~ 2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学: D 辑, 2007, **37**(6): 804 - 812 [FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, et al. Estimation of carbon sequestration in terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. Science in China Press: Series D, 2007, **37**(6): 804 - 812]
- [7] 石志华. 基于 CASA 与 GSMSR 模型的陕西省植被碳汇时空模拟及影响因素研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015 [SHI Zhihua. Spatial-temporal simulation of vegetation carbon sink and its influencing factors based on CASA and GSMSR models in Shaanxi Province [D]. Yanglin: Northwest A&F University, 2015]
- [8] 朱文泉,陈云浩,徐丹,等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005, **24**(3): 296 - 300 [ZHU Wenquan, CHEN Yunhao, XU Dan, et al. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, **24**(3): 296 - 300]
- [9] PACALA S W, HURTT G C, BAKER D, et al. Consistent land and atmosphere-based US carbon sink estimates [J]. Science, 2001, **292**(5525): 2316 - 2320.
- [10] JANSSENS I A, FREIBAUER A, CIAIS P, et al. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions [J]. Science, 2003, **300**(5625): 1538 - 1542.
- [11] DELCOURT H R, HARRIS W F. Carbon budget of the southeastern US biota: analysis of historical change in trend from source to sink [J]. Science, 1980, **210**(4467): 321 - 323.
- [12] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, **263**(5144): 185 - 189.
- [13] WOFSY S C, GOULDEN M L, MUNGER J W, et al. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest [J]. Science, 1993, **260**(5112): 1314 - 1317.
- [14] 方精云,朴世龙,郭庆华. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇 [J]. 植物生态学报, 2001, **25**(5): 594 - 602. [FANG Jingyun, PIAO Shilong, GUO Qinghua. The carbon sink the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, **25**(5): 594 - 602]
- [15] 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. [LIU Chunyu. The temporal-spatial changes and dynamic mechanism of carbon sources/sink of provincial ecosystem—a case of Gancu province [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015]
- [16] 汤洁,姜毅,李昭阳,等. 基于 CASA 模型的吉林西部植被净初级生产力及植被碳汇量估测 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(4): 1 - 7 [TANG Jie, JIANG Yi, LI Zhaoyang, et al. Estimation of vegetation net primary productivity and carbon sink in western Jilin province based on CASA model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, **27**(4): 1 - 7]
- [17] 石羊河 - 百度百科 [Shiyang River - Baidu Encyclopedia] [EB/OL] [2017 - 09 - 01] <https://baike.baidu.com/item/%E7%9F%B3%E7%BE%8A%E6%B2%B3/5082526?fr=Aladdin>
- [18] 李博,石培基,金淑婷. 石羊河流域植被生态系统生态风险评

- 价研究[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(1): 201–205. [LI Bo, SHI Peiji, JIN Shuting. Ecological risk assessment of vegetation ecosystem in Shiyang River Basin [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2013, **33**(1): 201–205]
- [19] 梁变变, 石培基, 王伟, 等. 基于 RS 和 GIS 的干旱区内陆河流域生态系统质量综合评价—以石羊河流域为例[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(01): 199–209. [LIANG Bianbian, SHI Peiji, WANG Wei, et al. Comprehensive evaluation of the inland river basin ecosystem quality in arid zone based on RS and GIS—a case of Shiyang River Basin [J]. Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(01): 199–209]
- [20] 赵军, 马小平, 魏伟. 近 50 年黑河流域潜在植被的演替及生态环境变化研究[J]. 草业学报, 2014, **23**(5): 61–68. [ZHAO Jun, MA Xiaoping, WEI Wei. Vegetation succession and ecological changes in the Heihe River watershed over the past 50 years [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, **23**(5): 61–68]
- [21] 刘宪锋, 任志远, 林志慧, 等. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, **68**(7): 897–908. [LIU Xianfeng, REN Zhiyuan, LIN Zhihui, et al. Spatial-temporal variation of vegetation coverage in source area of Sanjiang from 2000 to 2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, **68**(7): 897–908]
- [22] 李海亮. 基于 MODIS 数据的石羊河流域植被覆盖时空变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2009 [LI Hailiang. Study on the temporal-spatial changes of vegetation cover in Shiyang River Basin based on MODIS data [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2009]
- [23] 甘肃省水利厅、石羊河流域管理局. 石羊河流域概况 [Water Resources Department of Gansu Province, Shiyang River Basin Administration. A survey of the Shiyang River Basin] [EB/OL] [2017–09–01] http://www.gssl.gov.cn/syhgj/zjsyh/lygk/xzqh/201707/t20170717_78803.html.
- [24] 魏伟, 石培基, 冯海春, 等. 干旱内陆河流域人居环境适宜性评价—以石羊河流域为例[J]. 自然资源学报, 2012, **27**(11): 1940–1950. [WEI Wei, SHI Peiji, FENG Haichun, et al. Study on the suitability evaluation of the human settlements environment in arid inland river basin – a case study on the Shiyang River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2012, **27**(11): 1940–1950]
- [25] 张瑞君, 段争虎, 谭明亮, 等. 石羊河流域天然植被生态需水量估算及预测[J]. 中国沙漠, 2012, **32**(02): 545–550. [ZHANG Ruijun, DUAN Zhenghu, TAN Mingliang, et al. Estimation and prediction ecological water demand of natural vegetation in Shiyang River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2012, **32**(02): 545–550]
- [26] 魏伟, 石培基, 赵军, 等. 石羊河流域海拔、植被覆盖与景观类型空间关系研究[J]. 干旱区地理, 2012, **35**(01): 91–98. [WEI Wei, SHI Peiji, ZHAO Jun, et al. Spatial relationship between elevation, vegetation cover and landscape types in Shiyang River Basin [J]. Arid Land Geography, 2012, **35**(01): 91–98]
- [27] 王静, 王克林, 张明阳, 等. 南方丘陵山地 NDVI 时空变化及其驱动因子分析[J]. 资源科学, 2014, **36**(8): 1712–1723. [WANG Jing, WANG Kelin, ZHANG Mingyang, et al. Spatial-temporal changes and driving factors of NDVI in Hilly Mountains of South China [J]. Resource Science, 2014, **36**(8): 1712–1723]
- [28] 和清华, 谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(2): 308–319. [HE Qinghua, XIE Yun. Research on the climatological calculation method of solar radiation in China [J]. Journal of Natural Resources, 2010, **25**(2): 308–319]
- [29] TANG X, FAN S, QI L, et al. Soil respiration and net ecosystem production in relation to intensive management in Moso bamboo forests [J]. Catena, 2016, **137**: 219–228
- [30] ZHANG L, GUO H, JIA G, et al. Net ecosystem productivity of temperate grasslands in northern China: An upscaling study [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2014, **184**(1): 71–81
- [31] 巩杰, 张影, 钱彩云. 甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化[J]. 生态学报, 2017, **37**(15): 5121–5128 [GONG Jie, ZHANG Ying, QIAN Caiyun. Spatial-temporal variation of net ecosystem productivity in the white Longjiang basin of Gansu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(15): 5121–5128]
- [32] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 等. 青藏高原高寒草原区域碳估测[J]. 地理研究, 2010, **29**(1): 102–110. [PEI Zhiyong, ZHOU Caiping, OUYANG Hua, et al. A carbon budget of alpine steppe area in the Tibetan Plateau [J]. Geographical Research, 2010, **29**(1): 102–110]
- [33] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算—以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, **9**(3): 300–307. [ZHU Wenquan, PAN Yaoshong, LONG Zhonghua, et al. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: a case study in inner Mongolia, China [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, **9**(3): 300–307]
- [34] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, **19**(3): 193–200. [ZHOU Guangsheng, ZHANG Xinshi. Preliminary study on the net primary productivity model of natural vegetation [J]. Journal of Plant Ecology, 1995, **19**(3): 193–200]
- [35] ALLEN R G, PERREIRA L S, RAES D. et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [J]. FAO, Rome, 1998, **300**(9): D05109.
- [36] WALTER I A, ALLEN R G, ELLIOTT R, et al. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. [C]// Watershed Management and Operations Management 2000. ASCE, 2005: 1–11.
- [37] 潘竞虎, 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[J]. 生态学报, 2017, **37**(6): 1888–1899. [PAN Jinghu, HUANG Kejun, LI Zhen. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule river basin from 2001 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(6): 1888–1899]
- [38] 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[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(8): 39–43. [FENG Yiming, YAO Aidong, JIANG Lina. Improving the CASA model and applying it to estimate the net primary

- productivity of arid region ecology system [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, **28**(8): 39–43]
- [39] 孙维君, 李艳, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积累区微气象特征 [J]. 高原气象, 2013, **32**(6): 1673–1681. [SUN Weijun, LI Yan, QIN Xiang, et al. Characteristics of micrometeorological elements in accumulation zone of Laohugou glacier NO. 12 in Qilian mountains [J]. Plateau Meteorology, 2013, **32**(6): 1673–1681]
- [40] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. 植物生态学报, 2007, **31**(3): 413–424. [ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, **31**(3): 413–424]

Spatial Pattern of Vegetation Carbon Sinks Based on MODIS-NDVI Data: A Case Study in Shiyang River Basin, China

YUN Yinjuan, ZHAO Jun*

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Gansu Lanzhou 730070, China)

Abstract: To analyze the net ecosystem productivity (NEP) in a small-scale local ecosystem, in this paper the Shiyang River basin was taken as a case study, which is a typical inland river basin in the arid of northwest China. NEP was calculated by the net primary productivity (NPP) and heterotrophic respiration (R_H) based on MODIS images and meteorological data. By the calculated results of NEP, Shiyang River basin was divided into three parts, i. e., the carbon source area, the high carbon sink and the low carbon sink area. The results showed that the proposed method was able to quickly extract ecosystem net primary productivity and carbon sinks for the Shiyang River basin more efficiently, conveniently and practically. The spatial distribution of NEP displayed a decreasing trend from southwest to northeast. Carbon sinks and carbon sources showed a stripe-shaped distribution pattern. Carbon sources were mainly distributed in the desert areas around the downstream Minqin oasis. Low carbon sinks were mainly distributed in the plains of Hexi corridor in the middle reaches, while the high carbon sinks were mainly distributed in the upper reaches of Qilian Mountain. Due to the differences in light and other factors, the high carbon sinks were mainly distributed on the shady slopes, followed by the semi-sunny slopes and the semi-shady slopes, and the sun slopes were the least. The low carbon sinks were mainly located on the shady slopes and semi-sunny slopes. The analysis also effectively revealed the growth and distribution of vegetation in the Shiyang River basin.

Key words: MODIS-NDVI; carbon sink; net ecosystem productivity; CASA model; Shiyang river basin