

毛乌素沙地海流兔河流域植被净初级生产力估算

张 燕¹, 尹立河^{2,①}, 胡伏生¹, 贾伍慧¹, 王晓勇², 徐丹丹³, 张 俊², 刘天罡¹

[1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
3. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710064]

摘要: 采用 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型, 结合 TERRA MODIS 卫星数据和气象数据, 对毛乌素沙地海流兔河流域 2015 年各月的植被净初级生产力 (NPP) 进行估算, 并对植被 NPP 月平均值的时空分布规律及其与气象因子和地下水位埋深的关系进行了分析。结果表明: 毛乌素沙地海流兔河流域 2015 年植被 NPP 总量为 2.88×10^{11} g, 生长季 (4 月份至 10 月份) 的植被 NPP 总量达 2.81×10^{11} g, 占全年植被 NPP 总量的 97.57%。随着时间推移, 植被 NPP 月平均值和归一化差分植被指数 (NDVI) 月平均值呈“缓慢增加—急剧增加—急剧下降”的变化趋势。植被 NPP 月平均值季节变化明显, 春季、夏季、秋季和冬季植被 NPP 月平均值之和分别为 20.55、69.39、20.46 和 $0.48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从空间分布上看, 中部河谷和滩地的植被 NPP 月平均值总体上高于东南部、西部和西北部等沙丘荒漠区。月平均气温对植被 NPP 月平均值变化的影响最大, 其次为平均实际日蒸散发量和地表月太阳辐射。植被 NPP 月平均值随着地下水位埋深的增加而减小, 最大值出现在地下水位埋深 1~2 m 之间。上述研究结果显示: 采用 CASA 模型可以较好地估算毛乌素沙地海流兔河流域植被 NPP 值, 月平均气温和地下水位埋深对该流域植被 NPP 值的影响较大。

关键词: 毛乌素沙地海流兔河流域; 净初级生产力 (NPP); CASA 模型; 时空分布; 气象因子; 地下水位埋深

中图分类号: Q948.1; X87 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)03-0084-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.03.11

Estimation of vegetation net primary productivity in Hailiutu River catchment of Mu Us Sandland

ZHANG Yan¹, YIN Lihe^{2,①}, HU Fusheng¹, JIA Wuhui¹, WANG Xiaoyong², XU Dandan³, ZHANG Jun², LIU Tiangang¹ [1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey of China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(3): 84-91

Abstract: Taking CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) model, and combing TERRA MODIS satellite data and meteorological data, vegetation net primary productivity (NPP) of each month in Hailiutu River catchment of Mu Us Sandland in 2015 was estimated, and spatial and temporal distribution rule and its relationships with meteorological factors and depth to water table were analyzed. The results show that in 2015, total vegetation NPP is 2.88×10^{11} g in Hailiutu River catchment of Mu Us Sandland, and the sum of vegetation NPP during the growing season (April to October) reaches 2.81×10^{11} g, accounting for 97.57% of total vegetation NPP of whole year. With prolonging of time, monthly mean vegetation NPP and monthly mean normalized difference vegetation index (NDVI) appear the trend of “increasing slowly – increasing sharply – decreasing sharply”. The seasonal variation of monthly mean vegetation NPP is clear, and the sums of monthly mean vegetation NPP in spring, summer, autumn and winter are 20.55, 69.39, 20.46 and $0.48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. On the view of spatial distribution, monthly mean vegetation NPP in river valley and bottomland in middle area is generally higher than that

收稿日期: 2017-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41472228); 国土资源大调查项目 (12120113104100)

作者简介: 张 燕 (1993—), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事干旱区生态水文地质方面的研究。

①通信作者 E-mail: ylihe@cgs.cn

in dune and desert in southeastern, western and northwestern areas. The effect of monthly mean temperature on change of monthly mean vegetation NPP is the greatest, following by mean actual daily evapotranspiration and surface monthly solar radiation. With increasing of depth to water table, monthly mean vegetation NPP decreases, and the maximum value occurs in depth to water table of 1–2 m. It is suggested that vegetation NPP in Hailiutu River catchment of Mu Us Sandland can be estimated well by using CASA model, and monthly mean temperature and depth to water table have important effects on vegetation NPP in this catchment.

Key words: Hailiutu River catchment of Mu Us Sandland; net primary productivity (NPP); CASA model; spatial and temporal distribution; meteorological factor; depth to water table

在遥感应用中,常使用归一化差分植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)表示地表植被的生长状况。植被 NPP 值是指绿色植物在初级生产过程中,单位时间和面积积累的有机物质总量^[1]。植被 NPP 值是陆地生态系统质量状况的表征,反映自然条件下植物群落的生产能力,是全球碳循环研究的核心内容之一^[2-3]。准确估算植被 NPP 值有助于解决碳平衡、水资源开发的生态效应以及生态环境恢复评估等问题。但由于很难直接测量大范围的植被 NPP 值,故利用模型进行间接估算是目前的主流方式。目前,很多模型可用于估算植被 NPP 值,包括气候生产力模型、生理生态过程模型及光能利用率模型等^[4]。其中,光能利用率模型采用资源平衡原理^[2]估算植被 NPP 值,该模型所需的植被指数、植被实际吸收的光合有效辐射和地表温度等数据均可以直接从卫星遥感数据获得,能够实现区域或全球尺度上植被 NPP 空间分布的直观表达,是目前最常用的植被 NPP 值估算模型。CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型是一种被广泛使用的光能利用率模型,已用于研究陕北黄土高原地区^[5]及内蒙古锡林河流域^[6]植被 NPP 值的动态变化特征。

毛乌素沙地地处鄂尔多斯高原的中部和南部,位于荒漠草原—草原—森林草原的过渡带上,地貌以沙丘、滩地和河谷为主,属于典型的半干旱气候。该地区曾因不合理的农业发展和过度放牧,造成了土地荒漠化,植被退化严重^[7]。2000年以来,随着国家退耕还林(草)工程的实施,毛乌素沙地的生态环境得到很大改善。赵灿等^[8]的研究指出,毛乌素沙地典型沙生灌木植被可以基于地上部分的植被 NPP 值来估算地下部分的 NPP 值。2001年至2010年,毛乌素沙地(内蒙古部分)的植被 NPP 值呈上升趋势^[9]。潘桂行等^[10]通过对 NDVI 值的分析指出,2000年至

2014年,海流兔河流域的植被生态呈良性发展趋势。吕京京^[11]研究认为,海流兔河流域 NDVI 值存在明显的季节性变化。但尚无关于海流兔河流域植被 NPP 值的研究,海流兔河流域区域尺度上植被 NPP 值的时空分布特征尚不明确,对于月尺度上植被 NPP 值的变化规律也缺乏相关研究。

本研究以毛乌素沙地东南缘的海流兔河流域为研究区,利用遥感方法,采用 CASA 模型估算海流兔河流域 2015 年的植被 NPP 值,分析其时空变化规律及其与气候因子的关系,以期为该地区的生态环境修复提供技术支撑。

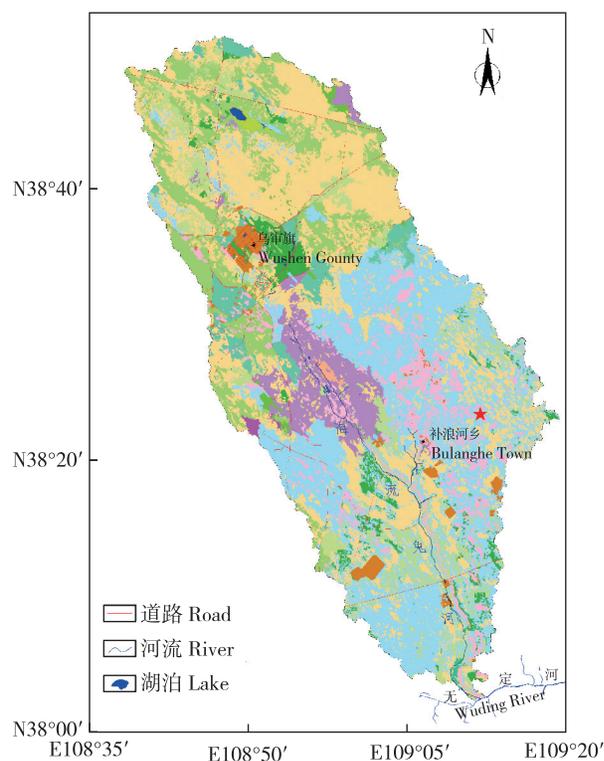
1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

海流兔河流域位于毛乌素沙地的东南缘,地理坐标为东经 108°38'18"~109°18'50"、北纬 38°02'18"~38°50'51",流域面积约 2 600 km²(图 1)。研究区内总的地势为北高、南低,东西高、中间低,高程一般为 980~1 480 m。流域内主要地貌类型为风沙滩地,流域中部为河谷地貌。海流兔河流域属典型的半干旱区气候,多年平均降水量 350 mm,多年平均潜在蒸散发量约 2 000 mm^[12]。研究区内的优势植被包括沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)、北沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Chang Y. Yang)和旱柳(*S. matsudana* Koidz.)等。研究区内地质条件简单,地表为第四系松散层,其下为白垩系洛河组砂岩,且多被第四系松散层覆盖。

1.2 数据来源

本研究采用美国国家航空航天局(NASA)地球观测系统(EOS)系列卫星提供的 TERRA MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)卫星数据,数据格式为 EOS-HDF(下载地址: <http://>



■: 芨芨草 *Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski; ■: 本氏针茅 *Stipa capillata* Linn.; ■: 早柳 *Salix matsudana* Koidz.; ■: 北沙柳 + 柠条锦鸡儿 *Salix psammophila* C. Wang et Chang Y. Yang + *Caragana korshinskii* Kom.; ■: 小叶锦鸡儿 *Caragana microphylla* Lam.; ■: 沙蒿 *Artemisia desertorum* Spreng.; ■: 北沙柳 *S. psammophila*; ■: 黑沙蒿 *Artemisia ordosica* Krasch.; ■: 低矮薹草 *Carex humilis* Leyss.; ■: 小叶锦鸡儿 + 黑沙蒿 *C. microphylla* + *A. ordosica*; ■: 小叶杨 *Populus simonii* Carr.; ■: 碱茅 + 卫矛 *Puccinellia distans* (Linn.) Parl. + *Euonymus alatus* (Thunb.) Sieb. ■: 城镇村及工矿用地 Urban village, industrial and mining land; ■: 耕地 Farmland; ■: 其他用地 Other land. ★: 国土资源部地下水与生态-陕西榆林野外科学观测研究基地 Groundwater and Ecology of Ministry of Land and Resources-Field Scientific Observation and Research Station in Yulin, Shaanxi.

图1 毛乌素沙地海流兔河流域地理位置及植被类型
Fig. 1 Geographic location and vegetation types in Hailiutu River catchment of Mu Us Sandland

landsweb.nascom.nasa.gov/), 卫星过境时间为上午 10:30。主要选取 MOD09 地表反射率产品(空间分辨率 500 m)、MOD11 地表温度/地表比辐射率产品(空间分辨率 1 km)以及 MOD13 植被指数产品(空间分辨率 250 m), 时间序列均为 2015 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日。利用 MRT(modis reprojection tool)工具从 MOD11 地表温度/地表比辐射率产品中提取地表温度。利用 ENVI 5.1 软件从 MOD13 植被数据产品中提取 NDVI 值。所有遥感影像数据在 ENVI 5.1 软件中进行投影变换和重采样, 以保证遥感影像数据的一致性。

气象数据来自国土资源部地下水与生态-陕西榆林野外科学观测研究基地, 该基地位于陕西省榆林区榆阳区补浪河乡, 地理坐标为东经 109°11'42"、北纬 38°23'27", 平均海拔 1 250.5 m(图 1)。气象数据包括气温、风速和降水量。使用 ONSET HOBO S-LIB-M003 高精度太阳总辐射传感器(美国 ONSET 公司)监测地表瞬时太阳辐射, 据此计算地表月太阳辐射。气象数据的时间序列与遥感影像数据一致, 即从 2015 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日。

1.3 研究方法

基于 CASA 模型, 结合遥感影像和气象等数据, 利用植被实际吸收的光合有效辐射(absorbed photosynthetically active radiation, APAR) 和实际光能利用率(ϵ) 估算植被 NPP, 其估算公式为 $NPP = APAR \cdot \epsilon$ [13]。植被 NPP 总量为 NPP 月平均值之和与流域面积的乘积。

采用 Su [14-15] 提出的基于表面能量平衡系统(Surface Energy Balance System, SEBS) 的模型计算区域实际日蒸散发量。地球表面任意点能量平衡的计算公式为 $R_n = G_0 + H + \lambda E$ 。式中: R_n 为净辐射通量; G_0 为土壤热通量; H 为感热通量; λE 为潜热通量, 其中, λ 为汽化潜热, E 为瞬时蒸散发量。该模型中实际日蒸散发量的计算公式为 $E_{\text{daily}} = 8.64 \times 10^7 \beta [(R_n - G_0) / \lambda \rho_w]$ 。式中: E_{daily} 为实际日蒸散发量; β 为日蒸发比; ρ_w 为水密度。

1.4 数据处理与统计分析

利用 ENVI 5.1 软件对遥感影像数据进行几何校正、重采样、波段运算、统计等处理; 利用 ArcGIS 10.2 软件绘制地下水埋深图并导入 ENVI 5.1 软件重采样, 使其与遥感影像数据的空间分辨率保持一致; 采用 EXCEL 2013 软件对数据进行整理等处理; 采用 SPSS 18.0 统计分析软件对计算结果进行统计分析, 并对相关性进行显著性检验。

2 结果和分析

2.1 时间变化分析

毛乌素沙地海流兔河流域 2015 年各月份植被 NPP 月平均值和 NDVI 月平均值的变化见图 2。

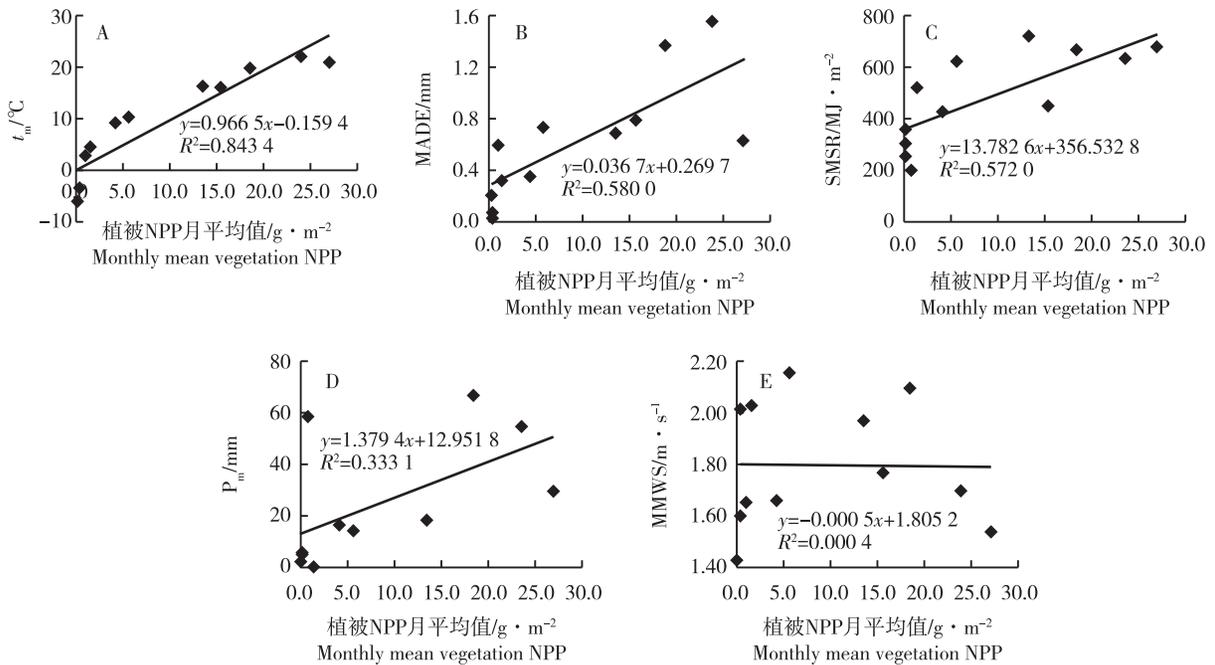
由图 2 可见: 毛乌素沙地海流兔河流域 2015 年植被 NPP 月平均值总和为 $110.88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。随着时间推移, 植被 NPP 月平均值呈“缓慢增加—急剧增

可见:海流兔河流域植被 NPP 月平均值的变化在空间上差异较大。1 月份至 8 月份植被 NPP 月平均值呈增加趋势,9 月份至 12 月份植被 NPP 月平均值呈下降趋势。毛乌素沙地海流兔河流域中部植被 NPP 月平均值高于东南部、西部和西北部,尤其是中部河谷及河两岸的滩地的植被生长情况优于其他地区。

2.3 与气象因子的关系分析

采用一元线性回归方法分析毛乌素沙地海流兔河流域 2015 年各月植被 NPP 月平均值与气象因子的相关性,结果见图 4。由图 4 可见:毛乌素沙地海

流兔河流域植被 NPP 月平均值与月平均气温的相关性最强(图 4-A), R^2 值达到 0.843 4,相关性达到极显著水平($P<0.01$);植被 NPP 月平均值与平均实际日蒸散发量(图 4-B)和地表月太阳辐射(图 4-C)的相关性较强, R^2 值分别为 0.580 0 和 0.572 0,相关性均达到极显著水平;植被 NPP 月平均值与月降水量的相关性较弱(图 4-D), R^2 值仅为 0.333 1,相关性达到显著水平($P<0.05$);而植被 NPP 月平均值与月平均风速无相关关系(图 4-E), R^2 值极小,仅为 0.000 4。



t_m : 月平均气温 Monthly mean temperature; MADE: 平均实际日蒸散发量 Mean actual daily evapotranspiration; SMSR: 地表月太阳辐射 Surface monthly solar radiation; P_m : 月降水量 Monthly precipitation; MMWS: 月平均风速 Monthly mean wind speed.

图 4 毛乌素沙地海流兔河流域 2015 年植被净初级生产力 (NPP) 月平均值与气象因子的相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis between monthly mean vegetation net primary productivity (NPP) and meteorological factors in Hailiutu River catchment of Mu Us Sandland in 2015

2.4 与地下水位埋深的关系分析

采用毛乌素沙地海流兔河流域 8 月份植被 NPP 月平均值与同期实测的地下水位埋深分析植被与地下水的关系。将植被 NPP 月平均值与地下水位埋深在 ENVI 5.1 软件中进行重采样处理,共得到 29 575 个网格,以此绘制植被 NPP 月平均值与地下水位埋深的散点图(图 5)。毛乌素沙地海流兔河流域植被 NPP 月平均值与地下水位埋深的散点主要集中在植被 NPP 月平均值 10~40 $g \cdot m^{-2}$ 及地下水位埋深小于

15 m 的区间范围内。

为了定量描述毛乌素沙地海流兔河流域植被 NPP 月平均值与地下水位埋深的关系,按地下水位埋深 1 m 间隔计算植被 NPP 分段月平均值。由于地下水位埋深大于 40 m 的植被 NPP 月平均值上升可能是由农田灌溉造成的,故仅对地下水位埋深小于 40 m 的数据进行趋势性分析(图 6)。毛乌素沙地海流兔河流域内植被 NPP 分段月平均值随着地下水位埋深的增加而减小,呈负相关, R^2 值为 0.883 2,相关

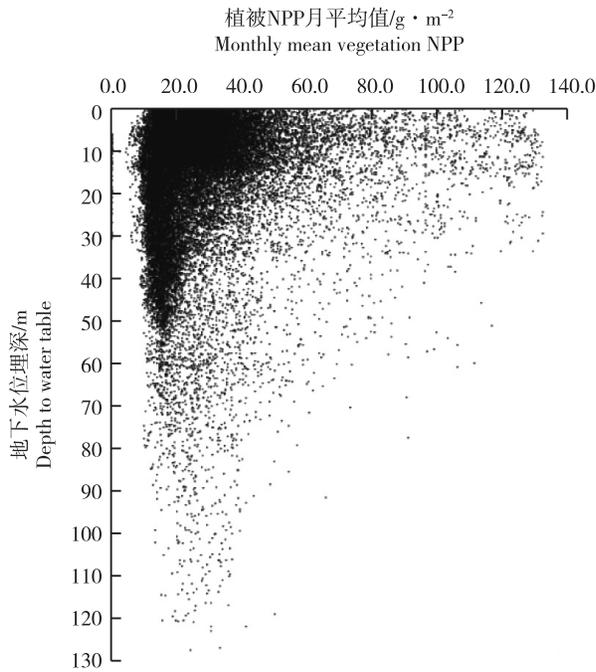


图 5 毛乌素沙地海流兔河流域 2015 年植被净初级生产力 (NPP) 月平均值与地下水位埋深散点图

Fig. 5 Scatter plot of monthly mean vegetation net primary productivity (NPP) and depth to water table in Hailutu River catchment of Mu Us Sandland in 2015

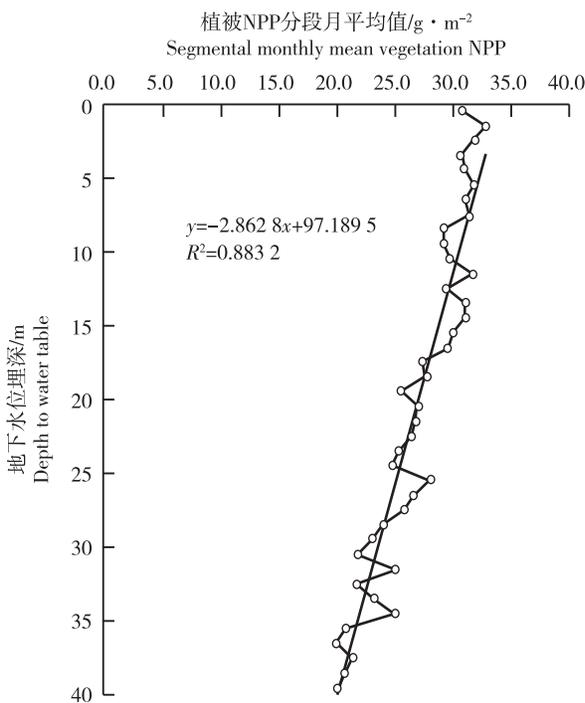


图 6 毛乌素沙地海流兔河流域 2015 年植被净初级生产力 (NPP) 分段月平均值与地下水位埋深的关系

Fig. 6 Relation between segmental monthly mean vegetation net primary productivity (NPP) and depth to water table in Hailutu River catchment of Mu Us Sandland in 2015

性达极显著水平 ($P < 0.01$)。植被 NPP 分段月平均值的最大值出现在地下水位埋深 1~2 m 之间, 推测此范围内地表植被类型丰富, 植被能够充分利用地下水^[16], 植被的发育状况较好。

3 讨 论

目前, 陆面植被 NPP 值无法直接测量, 利用模型估算植被 NPP 值是一种重要的且被广泛使用的研究方法^[17]。CASA 模型是光能利用率模型的一个典型代表, 在大尺度植被 NPP 值和全球碳循环研究中被广泛应用^[18]。朱文泉等^[19]与闫伟兄等^[20]在利用 CASA 模型估算植被 NPP 值时, 均采用周广胜等^[21]建立的模型计算区域实际蒸散发量, 但该模型只考虑了降水量和地表太阳净辐射, 忽略了平均气温和平均风速对区域实际蒸散发量的影响。崔旭东等^[22]及张雨航等^[23]采用水均衡法对海流兔河流域 SEBS 模型估算的蒸散发量进行验证, 结果证明 SEBS 模型计算出的区域实际蒸散发量是可靠的, 因此, 本研究采用 SEBS 模型估算区域实际日蒸散发量。

3.1 植被 NPP 值的时空变化

毛乌素沙地海流兔河流域植被 NPP 值具有明显的季节变化, 这与流域内地表太阳辐射、降水量、气温、日照时长以及农业生产活动等具有相关性^[24]。春季 (3 月份至 5 月份), 毛乌素沙地海流兔河流域内气温回升, 地表太阳辐射和降水量均有所增加, 植被开始复苏生长, 5 月份植被 NPP 月平均值明显增长; 夏季 (6 月份至 8 月份), 流域内进入高温季节, 降水量大幅度增加, 地表太阳辐射处于最高值, 水热条件均最适合植被生长, 植被 NPP 月平均值达到最大, 占全年植被 NPP 月平均值总和的 63.6%; 秋季 (9 月份至 11 月份), 气温回落, 降水量相对减少, 地表太阳辐射降低, 植被生长变缓且叶片开始枯黄掉落, 植被 NPP 月平均值迅速下降; 冬季 (12 月份至次年 2 月份), 整个流域内气候寒冷, 地表有降雪, 土壤有机质积累较少, 植被基本停止生长, 植被 NPP 月平均值降到最低^[25]。

毛乌素沙地海流兔河流域中部的植被 NPP 月平均值高于东南部、西部和西北部, 推测原因为流域中部主要为滩地地貌, 地下水位埋深较小, 植被覆盖度较高, 植被发育状况较好, 所以植被 NPP 月平均值也较高; 毛乌素沙地海流兔河流域东南部、西部和西北

部等地区主要为沙丘、沙盖基岩梁地地貌,地下水埋深较大,植被覆盖度较低,植被发育状况较差,植被NPP月平均值较低。

3.2 植被NPP值的影响因素

Field等^[2]提出陆地植被NPP值受气候、地形、土壤、植物生理特征以及人类活动等多种因素的综合影响。气候变化不仅会改变陆地生态系统的结构^[26],还会影响陆地生态系统的功能^[27]。已有研究表明:外界环境(温度、水分和CO₂浓度等)对陆地植被NPP值的影响非常复杂,不同地区气象因子对陆地植被NPP值的影响也各不相同^[28]。本研究中,影响毛乌素沙地海流兔河流域植被NPP月平均值最主要的气象因子为月平均气温,与潘竟虎等^[29]和陈强等^[30]指出的在月尺度上气温是植被NPP值变化的主控因子的结论一致。而穆少杰等^[9]研究认为,内蒙古荒漠草原植被NPP值主要受降水量控制,推测原因如下:一是研究区范围不同,穆少杰等^[9]将整个内蒙古地区作为研究区,其气候类型、降水量和植被类型的空间格局变化差异较大,而本研究的研究区范围相对较小,月降水量分布变化不大;二是穆少杰等^[9]的研究期为10年,而本研究期仅1年,具有一定的偶然性,因此,应在后续的研究工作中进行长时间序列、大空间尺度的研究。此外,不同学者对植被NPP值模拟的结论不同,也可能与选用的数据来源、时空分辨率、参数计算方法或估算模型等不同有关。

在干旱-半干旱地区,地下水往往控制着生态系统的结构、功能和多样性^[31]。植被的结构类型、生长状况及其分布规律通常与地下水有密不可分的联系。前人讨论了海流兔河流域NDVI值分布与地下水埋深之间的相互关系,指出随地下水埋深增加,NDVI值波动变小,NDVI最大值出现在地下水埋深2~3m之间^[32]。本研究中,毛乌素沙地海流兔河流域植被NPP月平均值随着地下水埋深的增加而减小,且植被NPP月平均值的最大值出现在地下水埋深1~2m之间,推测由于在地下水浅埋区,植被类型丰富,植被NPP月平均值较大。

由于本研究存在遥感影像数据空间分辨率低、未考虑人类活动影响等不足之处,因此,下一步研究重点应为利用高分辨率遥感影像数据研究长时间序列植被NPP值的动态变化,并分析年际尺度上植被NPP值与气候及人类活动的关系,为研究区的生态环境保护及发展提供数据支撑。

4 结 论

本文采用CASA模型,结合TERRA MODIS卫星数据和气象数据,对毛乌素沙地海流兔河流域2015年植被NPP进行了估算,主要得到以下结论:

1)毛乌素沙地海流兔河流域2015年植被NPP总量为 2.88×10^{11} g,生长季(4月份至10月份)的植被NPP总量达 2.81×10^{11} g,占全年植被NPP总量的97.57%。全年植被NPP月平均值总和为 $110.88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。月尺度上植被NPP月平均值呈“缓慢增加—急剧增加—急剧下降”的变化趋势,8月份的植被NPP月平均值最大,之后开始下降。春季、夏季、秋季和冬季植被NPP月平均值之和分别为20.55、69.39、20.46和 $0.48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2)毛乌素沙地海流兔河流域植被NPP月平均值的空间分布趋势总体上为中部向东南部、西部和西北部递减,尤其是中部河谷和滩地的植被NPP月平均值高于其他地区;东南部、西部和西北部为沙丘荒漠区,主要地貌为沙丘、沙盖基岩梁地,植被覆盖度较低,其植被NPP月平均值也偏小。

3)毛乌素沙地海流兔河流域植被NPP月平均值变化的主要影响因子是月平均气温,其次是平均实际日蒸散发量和地表月太阳辐射;植被NPP月平均值与月平均风速不存在相关关系。

4)毛乌素沙地海流兔河流域植被NPP月平均值随地下水埋深的增加而减小,地下水埋深1~2m时,植被NPP月平均值最大。

参考文献:

- [1] LIU J, CHEN J M, CIHLAR J, et al. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 27735-27754.
- [2] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTRÖM C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 74-88.
- [3] 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[J].*植物生态学报*,2001,25(5):603-608.
- [4] RUIYI A, SAUGIER B, DEDIEU G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 5263-5283.
- [5] 宋富强,康慕谊,陈雅如,等.陕北黄土高原植被净初级生产力的估算[J].*生态学杂志*,2009,28(11):2311-2318.
- [6] 张峰,周广胜,王玉辉.基于CASA模型的内蒙古典草原植

- 被净初级生产力动态模拟[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 786-797.
- [7] 丁国栋. 区域荒漠化评价中植被的指示性及盖度分级标准研究:以毛乌素沙区为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 158-160.
- [8] 赵 灿, 张宇清, 秦树高, 等. 3种典型沙生灌木 NPP 及其分配格局[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 62-67.
- [9] 穆少杰, 李建龙, 杨红飞, 等. 内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 6-15.
- [10] 潘桂行, 乔晓英, 黄金延, 等. 2000~2014 年海流兔河流域植被覆盖度变化及其驱动因素分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 264-267, 271.
- [11] 吕京京. 海流兔河流域地下水对植被指数分布的影响研究[D]. 北京:中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 2013: 60-63.
- [12] 张 强. 海流兔流域生态植被变化与环境影响因素研究[D]. 北京:中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 2011: 9-11.
- [13] 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.
- [14] SU Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6: 85-99.
- [15] SU Z. Remote sensing of land use and vegetation for mesoscale hydrological studies[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21: 213-233.
- [16] 王彦阁, 杨晓晖, 慈龙骏. 西鄂尔多斯高原干旱荒漠灌木群落空间分布格局及其竞争关系分析[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(2): 8-14.
- [17] ALEXANDROV G A, OIKAWA T, YAMAGATA Y. The scheme for globalization of a process-based model explaining gradations in terrestrial NPP and its application [J]. Ecological Modelling, 2002, 148: 293-306.
- [18] ICHII K, MATSUI Y, YAMAGUCHI Y, et al. Comparison of global net primary production trends obtained from satellite-based normalized difference vegetation index and carbon cycle model[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15: 351-363.
- [19] 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.
- [20] 闫伟兄, 陈素华, 乌兰巴特尔, 等. 内蒙古典型草原区植被 NPP 对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1625-1634.
- [21] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候-植被分类研究[J]. 植物学报, 1996, 38(1): 8-17.
- [22] 崔旭东, 陶正平, 张 俊, 等. 基于 SEBS 方法的蒸散量计算及可靠度分析:以鄂尔多斯高原海流兔河为例[J]. 勘察科学技术, 2011(6): 10-12, 55.
- [23] 张雨航, 王晓林, 胡光成. 基于 MODIS 数据的海流兔河流域蒸散量的计算[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(2): 375-380.
- [24] 卢 玲, 李 新, VEROUSTRAETE F. 黑河流域植被净初级生产力的遥感估算[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 823-830.
- [25] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统植被碳密度分布规律及其与气候因子的关系[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(1): 1-7.
- [26] ZAVALETA E S, SHAW M R, CHIARIELLO N R, et al. Additive effects of simulated climate changes, elevated CO₂, and nitrogen deposition on grassland diversity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100: 7650-7654.
- [27] CAO M, ZHANG Q, SHUGART H H. Dynamic responses of African ecosystem carbon cycling to climate change [J]. Climate Research, 2001, 17: 183-193.
- [28] 国志兴, 王宗明, 张 柏, 等. 2000 年~2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [29] 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[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [30] 陈 强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [31] ROBINSON D A, CAMPBELL C S, HOPMANS J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7: 358-389.
- [32] LV J, WANG X S, ZHOU Y, et al. Groundwater-dependent distribution of vegetation in Hailiutu River catchment, a semi-arid region in China[J]. Ecohydrology, 2013, 6: 142-149.

(责任编辑:张明霞)