

doi: 10. 6046/zrzyg. 2022340

引用格式: 陈佩佩,张利华,崔越,等. 基于 BEPS – TerrainlabV2.0 模型的鄂西湄河流域 NPP 模拟及环境响应分析[J]. 自然资源遥感,2023,35(4):273 – 281. (Chen P P,Zhang L H,Cui Y,et al. Net primary productivity simulation and environmental response analysis of the Jianghe River basin in western Hubei Province based on the BEPS – TerrainLabV2.0 model[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(4):273 – 281.)

基于 BEPS – Terrainlab V2.0 模型的鄂西湄 河流域 NPP 模拟及环境响应分析

陈佩佩, 张利华, 崔 越, 陈俊宏

(中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,武汉 430074)

摘要: 区域植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)的模拟估算及其时空变化规律对区域植被质量以及碳收支平衡分析具有重大意义。该文以鄂西湄河流域为研究区域,在对土地覆盖、地形、土壤、气象、植被指数等输入数据预处理基础上,基于 BEPS – Terrainlab V2.0 模型对流域 1986—2017 年的 NPP 进行模拟估算,评价了其模拟精度,并探讨了流域 NPP 时空变化规律及其环境变化响应。结果表明:流域 NPP 在年内尺度上呈单峰状分布(夏季高、冬季低);年际上呈波动上升趋势。流域 NPP 在空间上呈南低北高分布特征。不同土地覆盖类型的 NPP 值表现为阔叶>混交>针叶>农田>城市;NPP 随高程的增加呈上升趋势,不同土壤质地的 NPP 值表现为砂土>砂质壤土>壤质砂土>粉砂壤土。在日尺度上对 NPP 影响最大的是辐射和温度,通过 0.01 显著性检验;年尺度上 LAI(leaf area index, LAI)对 NPP 影响最大,通过 0.01 显著性检验。

关键词: BEPS – TerrainlabV2.0 模型; 净初级生产力; 时空变化; 环境影响

中图法分类号: Q 948 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 – 034X(2023)04 – 0273 – 09

0 引言

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指在单位时间、单位面积内,植被通过光合作用得到的全部有机物去除植物呼吸消耗能量后的剩余部分^[1],NPP 不仅在碳循环中发挥着无可代替的作用,同时在生态系统中也扮演着不可或缺的角色^[2],很多国际研究项目,如“生物圈计划”、“世界气候研究计划”都把它列为研究的中心内容^[3]。目前,在环境问题以及碳循环备受关注的同时,研究植被净初级生产力以及其影响因子对减缓全球变暖以及分析区域生态系统循环过程等研究具有重要意义。

获取 NPP 的方法有很多:站点实测法、遥感数据产品以及模型模拟等。建立实测站点受研究区域条件影响较大并且只适用于小范围研究区域,人力耗费较大。MODIS 的 NPP 产品(MOD17A3)目前是广泛被认可和应用的数据产品,但是此产品时间分

辨率为 1 a,不适合研究较小时间尺度上的 NPP 情况,且空间分辨率为 500 m × 500 m,数据缺失像元较多,对于小流域尺度的 NPP 空间异质性分析适用性不强。随着遥感技术的不断发展,遥感资料覆盖范围广,更新速度快,遥感数据结合生态模型进行 NPP 的估算成为当前的研究热点之一,例如 BEPS – Terrainlab 模型^[4]、InIEC 模型^[5]、BIOME – BGC^[6]模型等。其中 BEPS – Terrainlab 模型是 BEPS 生态模型^[7]和 Terrainlab 分布式水文模型^[8]的耦合,是遥感驱动的生态过程模型,在实践运用的过程中形成了不同的版本^[9]。BEPS – Terrainlab V2.0 在模拟水文循环过程时不仅考虑了地表覆盖、植被结构、土壤特性等地理因素,同时还引入太阳辐射、降水等气候因素对结果的影响;另外考虑到地形因素以及阴阳叶对生态水文循环的影响,输出数据的空间分辨率为 30 m × 30 m,以日为时间步长,对于小流域尺度生态水文参数(如 NPP,ET 等)的时空演变分析更具有适用性。

收稿日期: 2022 – 08 – 16; 修订日期: 2023 – 01 – 09

基金项目: 国家自然科学基金“长江中游泥炭地微生物及其生物硅对人类活动的响应”(编号: 42271167)和流域关键带演化湖北省重点实验室开放课题“三峡库区碳 – 水循环模拟及其环境响应分析”(编号: CZE2022F03)共同资助。

第一作者: 陈佩佩(2001 –),女,硕士,主要研究方向为流域环境演变。Email: 1427661056@qq.com。

通信作者: 张利华(1974 –),女,博士,副教授,主要研究方向为流域环境演变分析和环境遥感。Email: zhanglihua7483@163.com。

颍河流域是南水北调水源保护的核心区域,本文在进行模型模拟精度分析的基础上,基于 BEPS – Terrainlab V2.0 模型对流域 1986—2017 年 NPP 的时空分布特征进行模拟,获得流域高分辨率的 NPP 分布数据,并探讨 NPP 时空演变特征及其对地形、土地覆盖、气候变化等因子的环境响应,模拟结果对流域植被保护、生态恢复以及碳循环特征等均具有重要的借鉴意义。

1 研究区概况

颍河是堵河的一级支流,河流总长 50 km,发源

于张家湾区的花果街道,共有大小支流 22 条,于黄龙镇东湾村处与堵河进行交汇,随堵河一起流入丹江口水库。颍河流域(图 1)位于湖北省十堰市城区西部,地理坐标为 E110°33′50″~110°42′9″,N32°27′27″~32°42′60″,流域面积 326 km²,整体地势西南高、东北低,流域海拔范围为 139~1 413 m。流域位于亚热带季风区,降雨以每年 6—9 月为主,年降雨量 800~1 000 mm。植被覆盖度较高,森林覆盖范围较广,主要植被类型有暖温带落叶阔叶林、暖温带常绿针叶林、针阔混交林等。

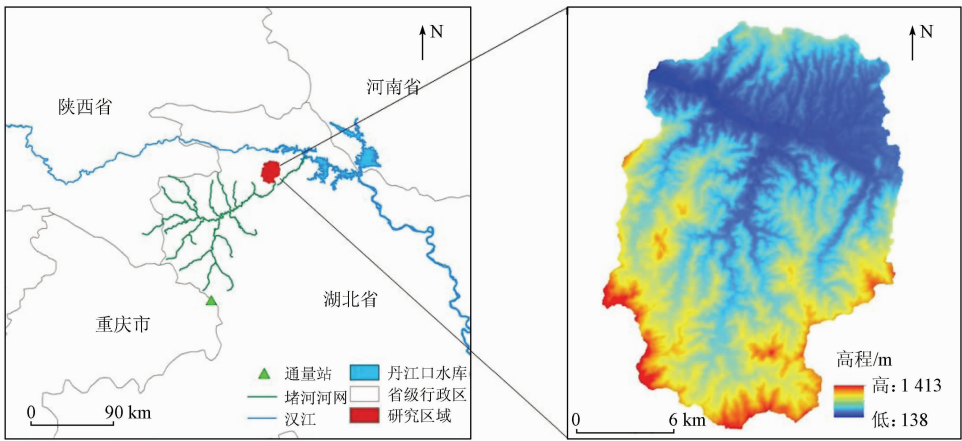


图 1 颍河流域地理位置
Fig. 1 Geographical location of the Jianghe River basin

2 数据与方法

2.1 BEPS – TerrainlabV2.0 模型原理

BEPS – TerrainlabV2.0 包含冠层辐射传输、碳循环、水循环、生理调节等模块^[10],模型输入数据包括高程、坡度坡向、土壤质地、气象、土地覆盖类型、叶面积指数(leaf area index, LAI),空间分辨率为 30 m × 30 m。模型输出数据包括蒸散发、总初级生产力、净初级生产力、地表径流、地下水位、土壤温度和土壤湿度等生态水文数据,以日为时间步长,空间分辨率与输入数据一致。其在模拟植物光合作用时将植物叶片划分为阳叶和阴叶^[11],分别计算阳叶和阴叶的光合过程,利用逐日积分方法在时间上进行了扩展,获得植被的总初级生产力,在扣除植物自身呼吸之后,获得植物的净初级生产力^[12]。

1)将冠层分为阳叶与阴叶分别计算植被冠层叶面积指数,公式为:

$$LAI_{sun} = 2\cos\theta[1 - \exp(-0.5\Omega LAI/\cos\theta)] \quad (1)$$

$$LAI_{shade} = LAI - LAI_{sun} \quad (2)$$

式中: LAI 为叶面积指数; LAI_{sun} 和 LAI_{shade} 分别为阳叶、阴叶的植被冠层叶面积指数; θ 为太阳高度角; Ω 为叶片聚集度指数。

2)计算植被冠层总初级生产力 GPP_{canopy},公式为:

$$GPP_{canopy} = A_{sun} LAI_{sun} + A_{shade} LAI_{shade} \quad (3)$$

式中: A_{sun} 和 A_{shade} 分别为阳叶、阴叶的净同化速率(mol · m⁻² · s⁻¹)。

3)计算 NPP, NPP 通过 GPP 扣除植物自养呼吸(R_a)后得到,自养呼吸由生长呼吸(R_g)和维持性呼吸(R_m)2 部分组成,公式为:

$$R_g = 0.2GPP \quad (4)$$

$$R_m = \sum (R_{m,i}, R_{g,i}) \quad (5)$$

$$R_a = R_m + R_g \quad (6)$$

$$NPP = GPP - R_a \quad (7)$$

式中: GPP 为总初级生产力; i 是指植被的不同组分

(1,2,3 分别代表叶、茎、根)。

2.2 数据源及其预处理

1) 高程数据。数据源自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 的 SRTM1 DEM 数据,空间分辨率为 30 m,下载影像行列号为 path110/row032。使用 ArcGIS 软件对 DEM 数据进行处理,通过水文分析等工具可以获得研究流域边界,同时可以获取研究区域坡度、坡向数据以及裁剪其他数据的掩模。

2) 遥感数据。数据源自美国地质调查局官网 (<http://glovis.usgs.gov/>) 的 Landsat5 – 8 影像数据,选取生长季(5—9 月)影像进行下载,空间分辨率为 30 m × 30 m,下载影像行列号为 path125/row037,2013 年前使用 Landsat5 数据,2013 年后使用 Landsat8 数据。在 ENVI 中对下载的遥感影像数据进行预处理后使用流域边界数据进行批量裁剪,使用神经网络法进行土地覆盖类型分类,将土地覆盖类型分为阔叶林、水体、城镇、针叶林、混交林、裸地、农田 7 种,以 5 a 为间隔进行土地覆盖分类。模型需要输入时间序列 LAI,建立常用植被指数(归一化植被指数、比值植被指数、差值植被指数、调整土壤亮度植被指数、大气阻抗植被指数)与野外实测 LAI 值的回归模型,选取了线性方程中 R^2 最高的反演模型,即 RVI 与 LAI 的线性拟合方程,公式为:

$$LAI = 1.073 5RVI^{-5.3219} \quad (8)$$

在 ENVI 中使用波段运算得到 RVI,再通过此方程计算 LAI。

3) 气象数据。获取到的十堰市气象数据包括 1986—2017 逐年间日尺度的最高温、最低温、平均气温以及降水。使用 Magnus – Tentens 近似法将缺少的露点温度补充完整。研究区域所属地级市无太阳辐射数据,使用反距离加权法将研究区域周围 4 个方向的城市气象站(安康、侯马、南阳、宜昌)的太阳辐射数据进行加权平均,得到的数据来代替研究区域的辐射数据输入模型。

4) 土壤数据。野外采集土壤样品,通过马尔文 3000 高分辨激光粒度仪测量土壤粒度,在 ArcGIS 中通过克里金插值绘制研究区域内每种粒度的分布图,在 ENVI 中通过波段运算将砂土、壤质砂土、砂质壤土和粉砂壤土 4 种不同土壤质地像元分别赋值为 10,20,30 和 40。

2.3 研究方法

2.3.1 一元线性回归分析法

本研究采用一元线性回归分析法逐像元对湄河

流域植被净初级生产力在 1986—2017 年间变化趋势进行分析,计算公式^[13]为:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times N_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n N_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (9)$$

式中: n 为时间序列的年份数,应用到本研究中 n 值取 32; i 为时间变量, $i = 1, 2, \dots, n$; N_i 指第 i 年的 NPP 均值; $slope$ 为研究因子的变化趋势, $slope > 0$ 时说明在研究时间范围内 NPP 值呈增长趋势, $slope < 0$ 时 NPP 值呈减少趋势, $slope$ 数值的大小表示 NPP 值增长或减少的幅度。

2.3.2 M – K 突变检验

M – K 检测可判定时间序列中有无突变,若有,则判定突变发生的时间^[14]。通过定义 UF, UB 这 2 个统计量来分析样本时间序列的变化趋势, $UF > 0$ 说明变化趋势持续增长, UF 与 UB 相交于置信区间 $[-1.96, 1.96]$ 内,说明该交点对应年份的相关数据在变化趋势上产生突变情况。

2.3.3 线性回归分析

线性回归的过程就是把各个自变量和因变量的值建立回归方程后,通过逐步迭代与拟合,找出回归方程式中的各个系数,构造出一个函数式,使用线性回归参数判断自变量和因变量的关系,由于本研究自变量较多,故而使用偏相关系数来进行相关性分析,能够在一定程度上减少自变量直接的相关性对分析结果的影响。

3 结果与分析

3.1 模型精度分析

3.1.1 通量站数据验证

由于研究区域范围内没有建立通量站,于是本次研究获取大九湖盆地的涡度相关系统 NPP 通量数据,获取的数据时间范围是 2016 年 1 月 1 日—2016 年 11 月 21 日。大九湖盆地地理位置处于湖北省神农架林区西部,距离研究区 130 余 km,通过临近地区通量站的数据来进行模型模拟精度的检验,绘制实测值和模拟值的变化趋势图见图 2。在图 2 中可以看到模拟值和实测值变化趋势大致相同,且吴宗钜在大九湖区域采用 BEPS – TerrainlabV2.0 模型模拟 NPP 值与大九湖实测 NPP 值拟合 $R^2 = 0.85$ ^[15],可以说明该模型在模拟小流域生

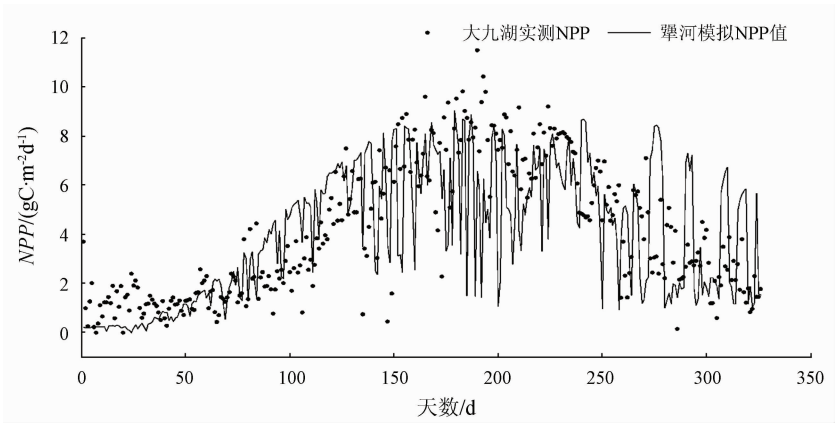


图 2 湄河流域模拟 NPP 与大九湖实测 NPP 数据对比图

Fig. 2 Comparison of simulated NPP data in the Jianghe River basin and measured NPP data in Dajiuhu

态水文过程上具有适用性,模拟结果具有分析价值。

3.1.2 NPP 产品数据交叉验证

MODIS 的 MOD17A3 是 NPP 产品(图 3),时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 500 m, MODIS 数据在该研究范围内存在较多空白值,且像元数量较少(共有1 471个有值像元),因而 MODIS 数据在小空间尺度研究上存在局限性。将模型模拟的不同覆盖

类型的年总 NPP 与其他模型模拟的 NPP 值进行对比,结果如表 1。从表中可以看出,模型模拟得到的值略高,但不同植被覆盖类型 NPP 值的大小关系基本相同。

表 1 BEPS – Terrainlab V2.0 模型模拟土地覆盖类型 NPP 数据与其他模拟或实测值对比

Tab. 1 Comparison of BEPS – Terrain labV2.0 model simulated land cover type NPP data with other simulated or measured values

覆盖类型	BEPS – Terrainlab V2. 0	刘世荣 等 ^[16]	朱文泉 等 ^[17]	刘明亮 等 ^[18]
阔叶林	1 336	250 ~ 1 300	114 ~ 1 669	945
针叶林	1 307	150 ~ 680	179 ~ 824	580
农田	993	—	—	752
混交	1 326	250 ~ 1 000	257 ~ 717	870

3.2 时间变化规律

3.2.1 时间分析

模型运行输出后得到的是 1986—2017 年间日尺度的 NPP 数据,依据不同的时间单位,可以从年尺度和日尺度上 2 个方面上对 NPP 进行时间变化的分析。以日为时间尺度,用来描述 NPP 在一年内的变化,将具体年份的年内变化进行汇总得到 NPP 年内变化的多年平均值,见图 4。

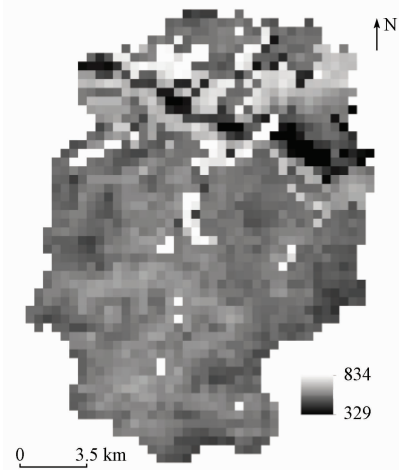


图 3 MOD17A3 数据空间分布

Fig. 3 MOD17A3 data spatial distribution

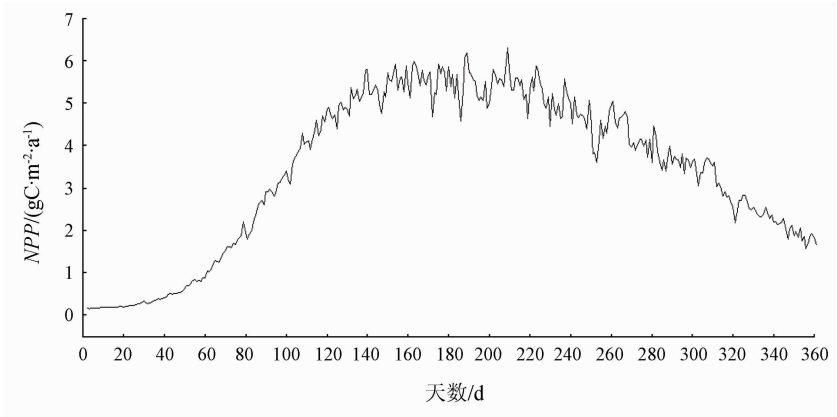


图 4 湄河流域 NPP 年内多年平均变化

Fig. 4 Multi – year average change of NPP in the Jiang River Basin

可以发现 NPP 年内多年平均随时间变化的走向呈单峰式变化,先升后降。冬季(1—60 天、330—365 天)值最低,春季(60—150 天)呈上升的趋势,夏季(150—240 天)时达到了峰值,也是 NPP 数值最高的阶段,秋季(240—330 天)NPP 呈缓慢下降的

趋势。从 NPP 变化的趋势可以看出,在夏季(150—240 天)内有突然下降的波动,并且在秋季(240—330 天)存在短暂波动较大的情况。
以年为时间尺度,统计 1986—2017 多年年总 NPP,反映多年来研究区域 NPP 变化的情况,见图 5。

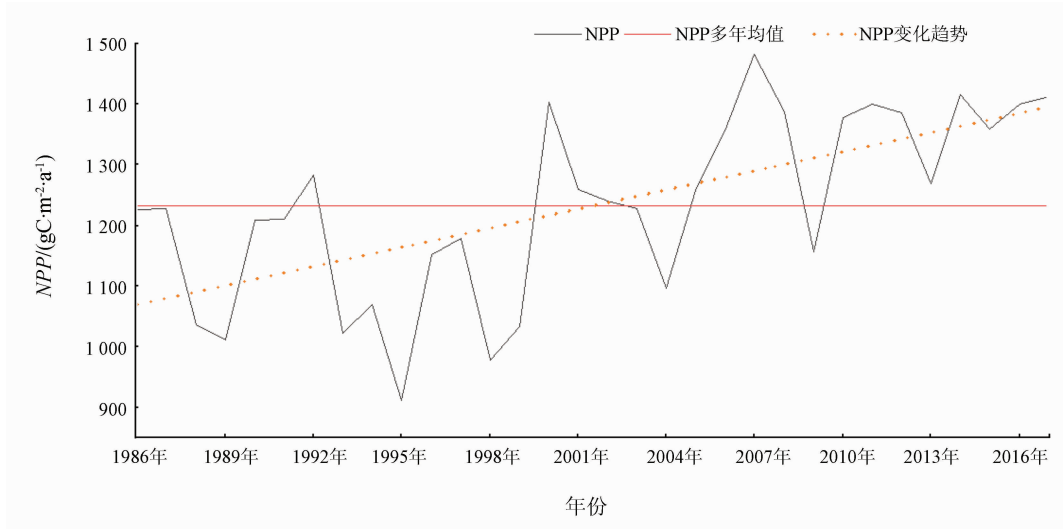


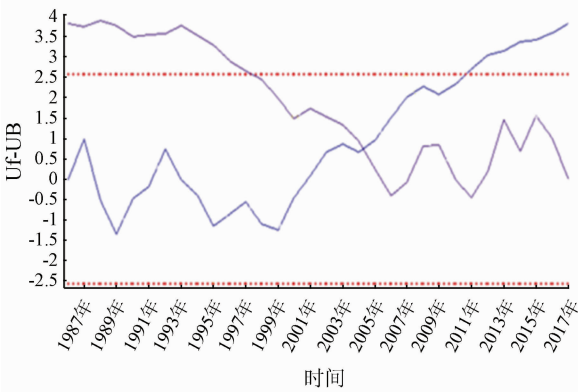
图 5 鄂河流域 NPP 多年年总变化
Fig. 5 The NPP of the Jiang River changes over the years

由图 5 可知,年总 NPP 大体变化趋势为波动上升,最低值出现在 1995 年,NPP 值为 $911.86 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,最高值出现在 2007 年,值为 $1482.28 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,1986—2017 年间 NPP 的多年平均值为 $1232.70 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

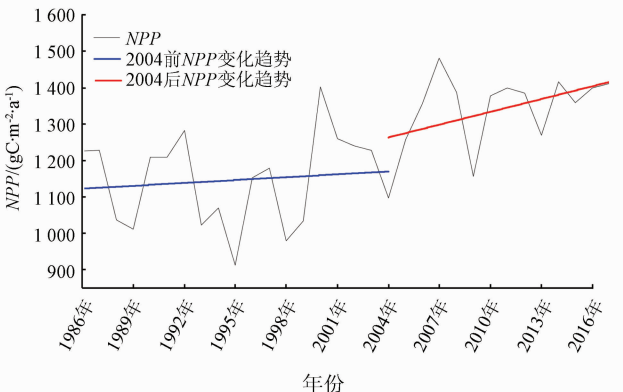
3.2.2 突变检验

使用 DSP 数据处理系统对多年年总 NPP 进行

M - K 检验,结果如图 6(a)所示,Uf - UB 曲线在置信水平区间内相交于 2004 年,说明 NPP 时间序列在 99% 置信水平下突变于 2004 年,以 2004 年为分界点绘制多年年际 NPP 变化趋势图,如图 6(b),可以看到 2004 年之后 NPP 的变化幅度明显大于 2004 年以前,2004 年以前,NPP 总体变化趋势较为平缓,2004 年以后 NPP 变化趋势明显增大。



(a) M - K 检验结果



(b) NPP 变化趋势

图 6 NPP 突变分析结果
Fig. 6 NPP mutation analysis results

3.3 空间变化规律

在 ENVI 中将模型输出的 1986—2017 年的年总 NPP 数据进行波段合成,输出研究区域多年平均 NPP 影像,能够得到研究区域多年平均 NPP 在空间

上的分布,如图 7(a)所示,通过一元线性回归分析对 1986—2017 年 NPP 数据进行分析,得到这 32 a 间 NPP 在空间上的变化趋势值,如图 7(b)所示。

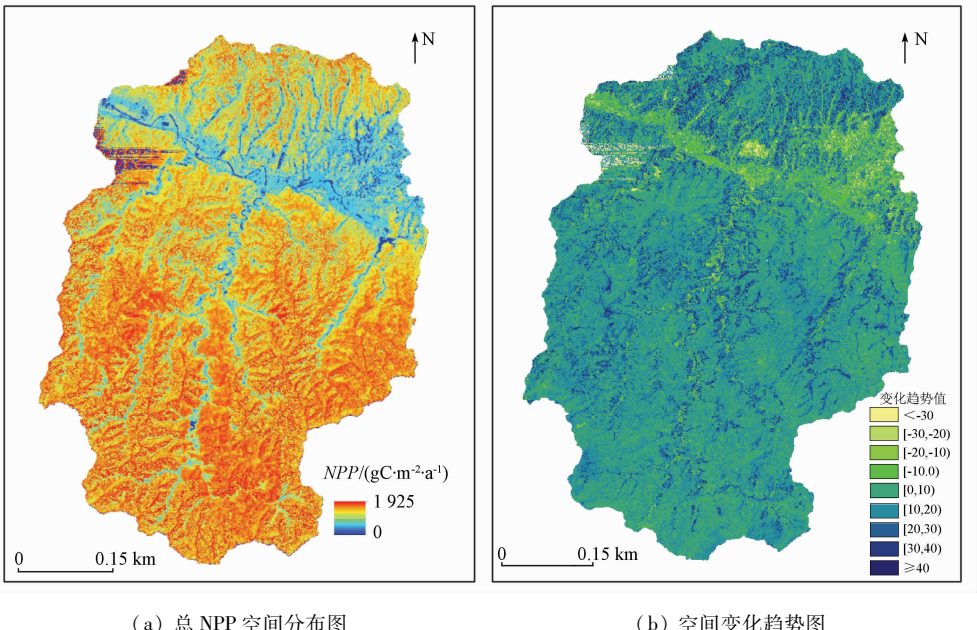


图 7 颍河流域多年年总 NPP 空间分析

Fig. 7 Spatial analysis of multi-year annual total NPP in the Jianghe River basin

多年 NPP 在空间上分布呈现南高北低的分布,南部最高可达到 $1\,925\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,在主流域附近 NPP 的值最低,受地势及不同土地覆盖类型的影响,NPP 的分布在空间上呈现差异性,图 7(b) 为 1986—2017 年 NPP 值在空间上变化的趋势,在大部分区域 NPP 值都呈现增加的趋势,在河流区域变化不大。

3.4 环境影响因子分析

3.4.1 土地覆盖因子

研究区域土地覆盖类型分为 7 类,主要有针叶林、阔叶林、混交林、水体、农田、裸地和城市。由于裸地以及水体植被覆盖度较低且分布面积占比不是很大,于是就其他 5 类类型数据来分析 NPP 的分布情况。由图 8(a) 可见,不同植被覆盖类型的 NPP 不同:阔叶>混交>针叶>农田>城市,结果与薛梅在东北地区估算的不同植被类型的 NPP 大小排序结果相同^[19]。其中混交林 NPP 的值最高,其次

针叶林 NPP 值略高于阔叶林。

3.4.2 土壤因子

将研究区 NPP 分布按照不同土壤质地进行划分,绘制箱线图如图 8(b),颍河流域不同土壤类型平均 NPP 按大小排序为:砂土($1\,363.8\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>砂质壤土($1\,177.1\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>壤质砂土($1\,348.6\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>粉砂壤土($932.9\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

3.4.3 地形因子

将研究区 NPP 分布按照不同高程进行划分如图 8(c),得到年总 NPP 随高程每增加 100 m 的变化趋势,NPP 随着海拔的上升而增加,在 100~900 m 呈上升趋势,在高程为 900 m 时达到最大值而后变化趋势逐渐趋于平稳,这与植被的垂直分布有关,在高程为 900~1 300 m 时,土地覆盖类型为针叶林和混交林,根据前文中已知混交林和针叶林的 NPP 值较高于其他土地覆盖类型。

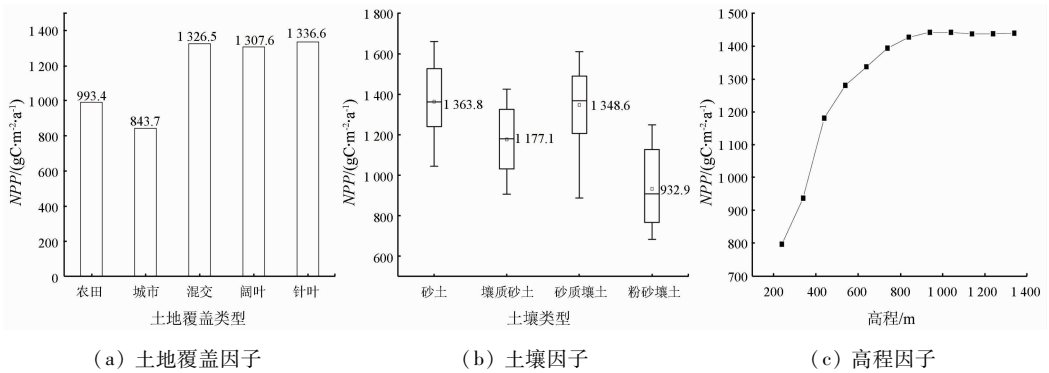


图 8 不同环境因子的 NPP 分布情况

Fig. 8 Distribution of NPP for different environmental factors

3.4.4 气象因子

影响 NPP 的变化气象因素有很多,诸如温度、辐射以及降水等,采用线性回归分析分析来探讨 NPP 与这些气象因子的相关性,可以进行较大尺度下的气象影响因素的分析。在 SPSS 中添加因变量年内 NPP 以及年际 NPP 数据和自变量气温、降水、辐射、风速、LAI 等自变量数据,对这些数据进行线性回归分析,由于自变量间可能存在互相影响,探讨各自变量对于因变量的影响力大小时,选择以偏相关系数大小为判断依据,以标准化回归系数作为参考(表 2)。

表 2 日尺度 NPP 线性回归方程参数

Tab.2 Summary of daily – scale NPP linear regression equations

日尺度 NPP	回归系数 (Beta)	标准化回归系数	显著性 (P 值)	偏相关系数
温度	0.135	0.496	<0.001	0.637
降水	-0.004	-0.011	0.035	-0.020
辐射	<0.001	0.522	<0.001	0.647
风速	-0.009	-0.003	0.589	-0.005
常量	-0.269	—	<0.001	—

由表 2 可以看出,影响力最高的是太阳辐射,偏相关系数为 0.647, P 值小于 0.001,说明辐射与 NPP 显著性正相关;其次温度的偏相关系数为 0.637, P 值小于 0.001,具有显著正相关,说明温度对 NPP 影响也较大。降水与风速的 P 值较大,与 NPP 存在弱负相关的关系,对 NPP 的影响较小(表 3)。

表 3 年尺度 NPP 线性回归方程参数

Tab.3 Summary of annual – scale NPP linear regression equations

年尺度 GPP	回归系数 (Beta)	标准化回归系数	显著性 (P 值)	偏相关系数
温度	26.587	0.094	0.515	0.134
降水	36.627	0.131	0.130	0.305
辐射	0.014	0.094	0.382	0.179
风速	14.530	0.041	0.720	0.074
LAI	224.511	0.814	<0.001	0.874
常量	-136.813	—	0.728	—

由表 3 可知,偏相关系数最高的是 LAI, P 值小于 0.001,属于极显著正相关,降水偏相关系数为 0.305,影响力有所提升;温度对年尺度 NPP 的影响显著降低,其他因素对年尺度 NPP 的影响都较小,偏相关系数较低且 P 值较大。

4 结论

本研究基于遥感以及气象等数据结合 BEPS – TerrainlabV2.0 模型对湖北省十堰市湄河流域

1986—2017 年 NPP 进行分析,讨论了其时空分布以及与环境因子的相关性分析,结果表明:

1)与相近地区通量站数据以及 MODIS 数据进行分析,验证了该模型对于较小空间尺度的适用性,同时与其他数据产品进行交叉验证,证实了模型结果的可用性。

2)湄河流域 NPP 的年际变化具有波动性,空间上总体分布南高北低,不同植被类型的 NPP 模拟值为阔叶>混交>针叶>农田>城市;不同土壤类型 NPP 值为砂土>砂质壤土>壤质砂土>粉砂壤土,同时 NPP 值随着海拔的上升而增加,在海拔为 900 m 以上时,增加的趋势逐渐趋于平缓。

3)日尺度上,气象因素对 NPP 影响较大,太阳辐射和温度与 NPP 的偏相关系数达到 0.6 左右,较长时间尺度上 NPP 对 LAI 的反响最强。

同时由于选取区域较小,无通量站观测数据,且目前国内存在的 NPP 数据产品大多是 500 m 分辨率,在对模型结果精度验证上有一定的局限性,考虑在后续的实验中进行进一步改进模型结果的验证准确性。

参考文献 (References):

[1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281 (5374): 237 – 240.

[2] 方精云,柯金虎,唐志尧,等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414 – 419.

Fang J Y, Ke J H, Tang Z Y, et al. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(4): 414 – 419.

[3] Steffen W, Noble I, M Apps, et al. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol [J]. Science, 1998, 280 (5368): 1393 – 1394.

[4] Govind A, Chen J M, Margolis H, et al. A spatially explicit hydro – ecological modeling framework (BEPS – TerrainLab V2.0): Model description and test in a boreal ecosystem in Eastern North America [J]. Journal of Hydrology, 2009, 367(3/4): 200 – 216.

[5] 赵少华,邱国玉,杨永辉,等. 遥感水文耦合模型的研究进展 [J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1391 – 1396.

Zhao S H, Qiu G Y, Yang Y H, et al. Advances in the coupled model of remote sensing and hydrology [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(6): 1391 – 1396.

[6] Azhdari Z, Rafeie Sardooi E, Bazrafshan O, et al. Impact of climate change on net primary production (NPP) in south Iran [J]. Environ Monit Assess, 2020, 192(6): 409.

[7] 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: Atmospheres, 1999, 104(D22): 27735 – 27754.

[8] Chen J M., Chen X Y, Ju W M, et al. Distributed hydrological

- model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 305(1/2/3/4): 15–39.
- [9] Sonnentag O, Chen J M, Roulet N T, et al. Spatially explicit simulation of peatland hydrology and carbon dioxide exchange: Influence of mesoscale topography [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G2): 477–481.
- [10] 陈镜明, 居为民, 刘荣高, 等. 全球陆地碳汇的遥感和优化计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Chen J M, Ju W M, Liu R G, et al. Remote sensing and optimization calculation method of global terrestrial carbon sink [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [11] 张方敏, 居为民, 陈镜明, 等. 基于 BEPS 生态模型对亚洲东部地区蒸散量的模拟 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(9): 1596–606.
- Zhang F M, Ju W M, Chen J M, et al. Study on evapotranspiration in east Asia using the BEPS ecological model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(9): 1596–606.
- [12] 王修信, 孙涛, 朱启疆, 等. 利用 BEPS 模型估算城区植被净初级生产力的时空变化 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(11): 1–5.
- Wang X X, Sun T, Zhu Q J, et al. Spatio-temporal variation of net primary productivity estimated with BEPS model in the urban area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(11): 1–5.
- [13] 田永生, 郭阳耀, 张培栋, 等. 区域净初级生产力动态及其与气象因子的关系 [J]. *草业科学*, 2010, 27(2): 8–17.
- Tian Y S, Guo Y Y, Zhang P D, et al. Relationship of regional net primary productivity and related meteorological factors [J]. *Pratacultural Science*, 2010, 27(2): 8–17.
- [14] 刘琦, 孙冰心. M-K 和滑动 T 确定穆棱河流域径流变化突变时间 [J]. *黑龙江水利*, 2015, 1(7): 35–37.
- Liu Q, Sun B X. Ensure the abrupt runoff change time in Muling river by M-K and sliding T method [J]. *Heilongjiang Water Resources*, 2015, 1(7): 35–37.
- [15] Wu Z F, Zhang L H, Liu D D, et al. Simulation of Evapotranspiration Based on BEPS-TerrainLab V2.0 from 1990 to 2018 in the Dajihu Basin [J]. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(6): 1095–1110.
- [16] 刘世荣, 王兵, 郭泉水. 大气 CO₂ 浓度增加对生物组织结构与功能的可能影响 II 植物种群、群落、生态系统结构和生产力对大气 CO₂ 浓度增加的响应 [J]. *地理学报*, 1996(s1): 141–150.
- Liu S R, Wang B, Guo Q S. Likely Impacts of Rising Atmospheric CO₂ Concentration on Plants and Ecosystems II. Responses of Plant Population, Community and Forest Ecosystem to Atmospheric CO₂ Enrichment [J]. *Acta Geographical Sinica*, 1996(s1): 141–150.
- [17] 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 W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413–424.
- [18] 刘明亮. 中国土地利用/土地覆盖变化与陆地生态系统植被碳库和生产力研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用技术研究所, 2001.
- Liu M L. Landuse/landcover change and terrestrial ecosystem phytomass carbon pool and production in China [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [19] 薛梅, 陈芸芝, 闫敏, 等. 中国东北地区植被 NPP 模拟与时空变化分析 [J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 821–830.
- Xue M, Chen Y Z, Yan M, et al. Simulation and spatio-temporal variation analysis of net primary productivity in Northeast China [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(6): 821–830.

Net primary productivity simulation and environmental response analysis of the Jianghe River basin in western Hubei Province based on the BEPS – TerrainLabV2.0 model

CHEN Peipei, ZHANG Lihua, CUI Yue, CHEN Junhong

(School of Geographic and Information Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The simulation-based estimation and spatio-temporal variations of the net primary productivity (NPP) of regional vegetation hold critical significance for analyzing regional vegetation quality and carbon balance. This study investigated the Jianghe River basin in western Hubei Province. First, it pre-processed the input data, including land cover, topography, soil, meteorology, and vegetation indices. Based on this, it estimated the NPP of vegetation in the Jianghe River basin from 1986 to 2017 using the BEPS-TerrainlabV2.0 model, with the model's simulation accuracy evaluated. Moreover, this study explored the spatio-temporal variations of the NPP and its response to environmental changes. The results are as follows: ① The NPP of vegetation in the Jianghe River basin exhibited a unimodal distribution, with higher values in summer and lower values in winter, on an intra-annual scale, and a fluctuating rising trend on an inter-annual scale; ② The spatial distribution of the NPP manifested

higher values in the north and lower values in the south; ③ The NPP values of different land cover types followed the sequence below: broad – leaved forests > mixed forests > coniferous forests > farmland > urban areas. The NPP rose with an increase in elevation. The NPP values of different soil textures rank below: sandy soil > sandy loam > loamy sand > silty loam; ④ Radiation and temperature manifested the strongest impact on NPP on a daily basis, and the leaf area index (LAI) exhibited the most significant influence on NPP on an annual basis, both passing the 0.01 significance test.

Keywords: BEPS – TerrainlabV2.0 model; net primary productivity; spatio – temporal variation; environmental impact

(责任编辑: 李 瑜)