

文章编号: 1008-2786-(2018)1-013-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000296

基于 BIOME-BGC 模型的三峡库区不同草地群落 碳源/汇的动态变化研究

周 伟,何顺兵,杨 晗,何绪刚,牟凤云

(重庆交通大学 建筑与城市规划学院 地理信息与国土资源系,重庆 400074)

摘 要: 三峡库区草地群落净生态系统生产力 (NEP) 的核算对于碳源/汇功能评价和生态屏障功能诊断具有重要理论意义。本文选取三峡库区的三种典型草地群落 (雀梅藤群落、芒草群落、扭黄茅群落) 为研究对象。基于气象数据和基础数据 (高程、植被类型、土壤质地等), 利用 BIOME-BGC 模型模拟并分析了 1999—2013 年库区草地群落植被 NPP、NEP 的变化特征及其与水热因子的相关性, 分析了碳储量的变化特征及储存分布差异。结果表明: 三种草地群落的植被 NPP、NEP 的年内变化规律均呈现倒 U 型, 其中 7—8 月数值最大, 呈现出明显碳源—碳汇—碳源的变化特征; 三种草地群落多年 NEP 的平均值分别为 6.63、4.85、4.17 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 碳汇功能明显。不同草地群落 NPP、NEP 对水热因子响应差异明显, 其中雀梅藤群落 NPP 与温度呈显著正相关, 与降水量呈负相关; 芒草群落、扭黄茅群落 NPP 与温度均呈负相关, 与降水量呈正相关; 三个草地群落的 NEP 与温度均呈正相关, 与降水量均呈负相关。三种草地群落碳储量丰富, 多年累计值分别为 33 979、50 750、29 236 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$, 且 85%~90% 储存在土壤中, 植被碳储量最少约为 3%~4%。

关键词: 碳汇; 草地群落; BIOME-BGC 模型; 碳循环; 三峡库区

中图分类号: Q945.11

文献标志码: A

伴随着全球社会经济的发展和城市化进程加快, 全球 CO_2 浓度从工业革命前的 280 ppm 升高到 2011 年的 391 ppm, 升高了 40%; 1880—2012 年间全球气温升高了 0.85°C , 温室效应日益严重, 受到国内外专家学者的广泛关注^[1]。然而, 草地作为陆地生态系统的重要组成部分, 在保持区域生态系统平衡稳定和碳循环过程中扮演非常重要的角色^[2]。植被净初级生产力 (NPP)、净生态系统生产力 (NEP) 及碳储量都是表征碳循环过程的关键指标, 是评价生态系统安全、维持生态系统平衡及生态危机预警的重要因素^[3-4]。因此, 自 20 世纪 80 年代以来, 国内外学者在不同时空尺度上建立了一系列从静态到动态模拟碳循环过程的模型, 如 MAIM^[5]、CASA^[6-7]、TEM^[8]、BIOME-BGC^[9] 等模

型, 被广泛应用于生态系统碳循环机制研究、生态环境质量评价及碳源/汇功能评估等方面^[10]。BIOME-BGC 模型由美国 Montana 大学的陆地动态数值模拟研究组提出并不断改进, 该模型被广泛应用于区域植被生态系统碳循环研究^[11-12], 同时在实测数据较少的干旱地区该模型也能够较好地模拟和反映碳循环的时空变化格局^[13-14]。

三峡库区是世界范围内生态功能最为特殊的区域生态系统之一, 库区内复杂多变的自然要素和快速发展的社会经济共同决定了三峡库区独特的生态地理位置^[15]。库区内植被群落的碳源/汇核算是评价库区生态功能的重要指标。目前三峡库区碳循环研究主要集中在利用林地调查数据和气象数据通过统计分析得到森林生态系统的生产力^[16-17]; 李月臣

收稿日期 (Received date): 2016-09-22; 改回日期 (Accepted date): 2017-03-12

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41501575); 重庆市科委项目 (cstc2016jcyjA1540); 重庆交通大学博士科研启动金 (14JDKJC-B017)。[National Natural Science Foundation of China (41501575); Basic Science and Advanced Technology Fund of Chongqing Scientific Council (cstc2016jcyjA1540); DR Launch of the Scientific Research (14JDKJC-B017)]

作者简介 (Biography): 周伟 (1984-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 生态环境遥感监测和 3S 技术。[Zhou Wei (1984-), female, Ph. D., associate professor, research on remote sensing of ecosystem and 3s technology] E-mail: zhouw866@163.com

等^[18]利用光能利用率模型(CASA模型)模拟并分析了库区包括草地在内的植被NPP,而基于生态过程模型(BIOME-BGC模型)评估库区草地群落碳源/汇和碳循环的研究尚未见报道。基于此,本文在三峡库区的涪陵和恩施两地共选择具有代表性的三种草地群落为研究对象,利用BIOME-BGC模型模拟1999—2013年恩施区域的雀梅藤群落和芒草群落、1999—2008年涪陵区域的扭黄茅群落的NPP、NEP和碳总量,揭示三峡库区草地群落固碳能力对气候变化的响应机制,为客观评价库区植被的碳源/汇功能和生态安全提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区(105°49′~111°39′E, 28°28′~31°44′N)地处四川盆地与长江中下游平原结合部,跨越鄂中山区峡谷及川东岭谷地带,北屏大巴山、南依川鄂高原(图1)。海拔较高,地形复杂且以山地、丘陵为主,垂直差异明显。区内属于亚热带季风气候,降水丰富但空间分布差异明显,蓄水后区域水蒸发量增加导致降水量进一步增加,区内崩塌、滑坡、泥石流等突发地质灾害频发,年水土流失量大,库区地质灾

害防治工作形势严峻。

本文选取三峡库区高山丘陵地带的三种典型草地群落,其中雀梅藤群落(109.254°E, 30.447°N)属于高山丘陵灌木草丛,平均海拔为1840 m,属于亚热带季风气候,年均温度15.4℃,年均降水量为874 mm,雨热同期,土壤为黄壤,质地为沙质壤土,有机质含量为2.29%,主要草地类型为雀梅藤、小果蔷薇、火棘、龙须藤灌丛。芒草群落(109.911°E, 30.164°N)属于高山丘陵草甸,平均海拔1558 m,属于亚热带季风气候,雾多寡照,年均日照1000~1350 d,年均温为16.5℃,年均降水量为976 mm,土壤为黄棕壤,质地为沙质壤土,有机质含量为1.73%,主要草地类型为芒草、野古草、金毛草丛。扭黄茅群落(107.626°N, 29.579°E)属于山地草丛,平均海拔为1446 m,属热带季风气候,年均温为18.4℃,年均降水量为1072 mm,土壤为黄壤、黄棕壤,质地为黏土,有机质含量为1.81%,主要草地类型为扭黄茅、龙须草、白茅草。

1.2 数据来源及处理

本文数据包括气象数据和站点收集数据。气象数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>),包括日最高温、最低温、降水量等,利用MTCLIM^[19]气候模

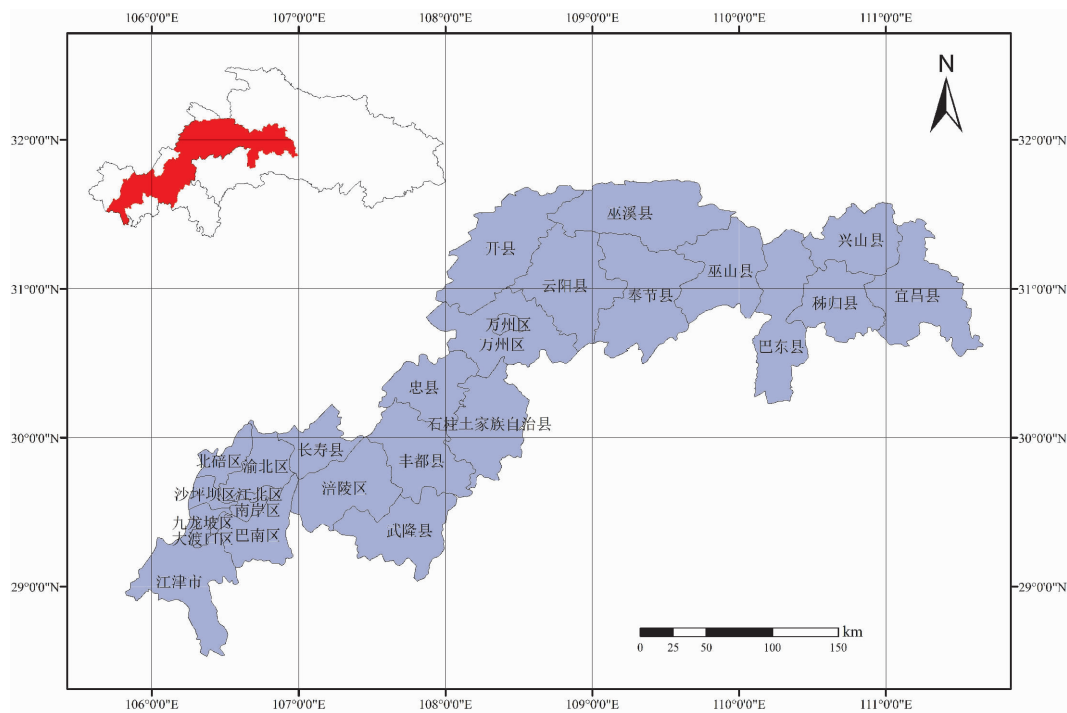


图1 三峡库区区位图

Fig. 1 Location of Three Gorges reservoir area

拟器估算目标站点的相关气象数据如湿度、水气压亏缺等^[20];观测站点收集数据包括经纬度、地形、土壤、植被类型等,植被生理参数通过查阅相关文献获取,以上数据是模型的初始输入数据。

1.3 BIOME-BGC 模型

BIOME-BGC 模型是利用植被生理生态参数、气象数据、观测站点收集的数据模拟区域生物地球化学各元素循环机制及其相互协同与干扰的过程模型,研究尺度从局部小区域扩展到全国及全球范围的陆地生态系统^[21-22]。模型综合程度高、机理性强,源代码公开,便于优化改进,被广泛应用于陆地生态系统碳、氮、水通量研究^[22]。模型运算过程的主要公式如下^[23-24]:

(1) 光合作用模型

$$V_j = V_{\max} f(T_{\min}) f(\omega) \quad (1)$$

$$V_n = \left(\frac{V_j LAL}{\beta} \right) \ln \left\{ \frac{V_j + \partial \cdot PAR}{V_j + \partial \cdot PAR \cdot \exp(-\beta LAI)} \right\} \quad (2)$$

$$P = V_j \cdot LAI \cdot \delta D \quad (3)$$

其中: V_j 是受温度和气温影响下的日最大光合作用速率; V_{\max} 是温度和降水条件达到最理想状态时的光合作用最大速率,对 C_4 和灌木分别取 7.5、6.0; T_{\min} 是每日最低温; ω 是土壤和水分影响下的气压值; V_n 为叶面积平均光合作用速率; LAL 为叶面积指数; β 为植被冠层消光系数; ∂ 为量子产率; PAR 光合有效辐射; P 为去除植被自养呼吸和异养呼吸后植被净光合作用; D 为日照射时长; δ 为最大光合作用时间占总日照时长的比例。

(2) 自养呼吸

$$R_s = \sum_{i=1}^4 R_{x,i} + R_g \quad (4)$$

$$R_{x,i} = M_i r_i T_{10}^{(T_a - T_b)/10} \quad (6)$$

$$R_g = r_g (GPP) \quad (6)$$

其中: R_s 表示植被总自养呼吸消耗; $R_{x,i}$ 表示植被叶、茎、粗根和细根四部分维持性呼吸消耗; R_g 植被生长呼吸消耗; M_i 为植被各组成部分生物量; r_i 为维持性呼吸系数; T_{10} 表示温度因子; T_a 、 T_b 分别表示空气温度和根部地表温度; r_g 为植被各组件生长呼吸系数。

(3) 植被凋落总量

$$L = \frac{R_l Q}{t_l} + \frac{R_r Q}{t_r} + \frac{R_s Q}{t_s} \quad (7)$$

其中: L 为植被散落到土壤有机物; Q 为植被碳储总

量; R_l 、 R_r 、 R_s 分别表示叶、根、茎占植被碳总量的比例; t_l 、 t_r 、 t_s 分别表示植被叶、根、茎平均存活时间。

(4) 异养呼吸

$$R_h = \sum_{i=1,2} k_i L_c A C_i + \sum_{i=3} k_i A T_m C_i + \sum_{i=4}^8 k_i L_c A C_i \quad (8)$$

其中: R_h 为微生物分解释放出的气体总量; k_i 为微生物最大分解速率; L_c 为木质素含量的影响; A 为土壤水分和温度的影响; C_i 为碳储量; T_m 为土壤对土壤有机物转换的影响; $i = 1 \cdots 8$ 分别表示表层结构、土壤结构、活跃有机质、微生物、表层代谢物、土壤代谢物、有机质缓慢分解权重和有机质被动分解权重。

BIOME-BGC 模型所需参数较多,本文模型参数的设定主要通过查阅参考文献和模型自身提供的草地生理生态参数^[25-26]。为了更好地适用库区碳循环研究,通过利用 white 等^[27] 对 BIOME-BGC 模型参数取值的统计分析方法,设定以不同文献参数均值为参数值(表 1),以消除部分区域气候差异的影响。

表 1 植被生理生态参数表

Tab. 1 Physiological parameters of vegetation

| 参数 | 单位 | C_4 | 灌木 |
|---------------|------------|-------|------|
| 新生细根碳:新叶碳 | | 1.0 | 1.0 |
| 新生干细胞碳:新叶碳 | | 2.2 | 0.22 |
| 新生木碳:总木碳 | | 0.086 | 1.0 |
| 新生增长比例 | | 0.5 | 0.5 |
| 叶子碳氮比 | kg C/kg N | 24.0 | 35.0 |
| 叶子凋落物周转碳氮比 | kg C/kg N | 49.0 | 75.0 |
| 细根碳氮比 | kg C/kg N | 42.0 | 58.0 |
| 活木碳氮比 | kg C/kg N | 58.0 | 58.0 |
| 死木碳氮比 | kg C/kg N | 730 | 729 |
| 叶子凋落物中纤维素比例 | | 0.33 | 0.29 |
| 叶子凋落物中易挥发物质比例 | | 0.58 | 0.66 |
| 新生细根中纤维素比例 | | 0.45 | 0.44 |
| 新生细根中木质素比例 | | 0.23 | 0.22 |
| 死茎中纤维素比例 | | 0.77 | 0.71 |
| 死茎中木质素比例 | | 0.23 | 0.29 |
| 冠层平均叶面积比 | $m^2/kg C$ | 45.0 | 12.0 |

2 结果与分析

2.1 模型结果验证

模型模拟结果的精度验证可通过对比实测数据或其它模型模拟结果^[28]。三峡库区高山丘陵较多,

植被 NPP 实测数据获取难度大,孙庆龄^[29]等已验证 BEPS 模型能够很好地模拟估算高山丘陵地区植被 NPP,因此,本文利用 BEPS 模型模拟获得的三种草地群落的结果评价 BIOME-BGC 模型模拟精度,同时也与他人针对草地 NPP 的模拟结果进行比较(表 2)。

表 2 不同草地群落的 NPP/NEP 模拟结果精度验证

Tab. 2 Precision validation of NPP and NEP in multiple grassland communities

| 目标区域 | 三峡库区 (NPP/NEP) | | 南方 (NPP/NEP) | 全国范围 (NPP) | |
|-------|-------------------|-------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| | BIOME-BGC | BEPS | 孙政国 ^[26] | Feng ^[30] | 陶波 ^[31] |
| | 模型 | 模型 | 等 | 等 | 等 |
| 雀梅藤群落 | 313.88/6.63 | 330.50/6.14 | | | |
| 芒草群落 | 593.37/4.85 | 521.27/3.79 | 351.17/3.25 | 374.20 | 348.00 |
| 扭黄茅群落 | 543.53/4.17 | 497.21/4.16 | | | |

从表 2 可知 BIOME-BGC 模型模拟的 NPP、NEP 与 BEPS 模型的模拟结果比较接近,三个草地群落 NPP 相对误差分别为 -5.03% 和 13.83% 和

9.32%, NEP 相对误差分别为 7.97%、27.97% 和 1.68%, 除芒草群落外相对误差较小,说明 BIOME-BGC 模型能够较好地模拟库区草地 NPP 和 NEP。与南方丘陵和全国草地 NPP 和 NEP 相比,除了雀梅藤群落 NPP 较小外,其它两个群落的 NPP 和 NEP 都高于南方和全国平均水平,这可能是与库区较好的水热条件有关。

2.2 NPP、NEP 的日变化趋势

从图 2 可以看出恩施近 15 年(1999—2013 年)和涪陵近 10 年(1999—2008 年)不同草地群落日平均 NPP 和 NEP 动态变化特征为:春冬季平稳小幅波动、夏季急剧波动上升和秋季急剧波动下降。①其中 1—3 月和 11—12 月由于气温低、降水量少,植被光合作用小,植被 NPP 较低且波动小,植被处于生长停歇阶段,生长呼吸消耗大于光合作用,NEP 呈负值;②4 月开始光热和降水量增加,植被进入快速生长阶段,光合作用大于呼吸作用使得植被 NPP、NEP 呈急剧波动上升;③7—8 月份温度最高、降水量最大,植被光合作用率最高,植被 NPP、NEP 处于顶峰;④9 月开始温度降低,降水量减少,草地进入

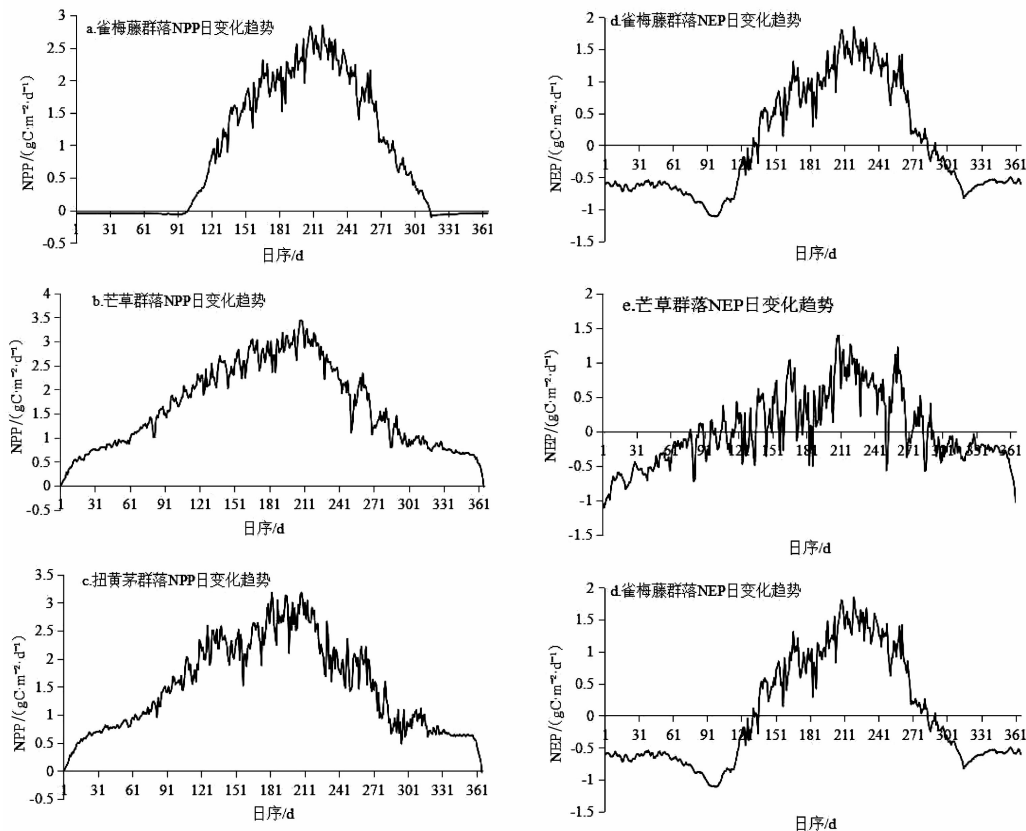


图 2 NPP、NEP 日变化趋势

Fig. 2 Diurnal variation trends of NPP and NEP

枯黄凋谢阶段,植被 NPP、NEP 呈波动下降趋势。⑤综合以上可以看出三个草地群落的年内 NPP 呈平稳—波动增加—波动减少—平稳趋势,NEP 则表现为负—正—负,反映出草地群落的年内碳收支呈碳源—碳汇—碳源的生态功能。植被 NPP 的季节变化特征与李月臣等^[18]对于库区植被 NPP 的研究规律基本一致。

2.3 NPP、NEP 的年际变化趋势

①从图 3 可以看出雀梅藤群落、芒草群落的植被 NPP、NEP 均呈波动上升趋势,扭黄茅群落植被 NPP、NEP 分别呈波动上升和波动下降趋势。②从图 3a-3c 可以看出三个草地群落年均植被 NPP 分别为 313.88、593.57、543.52 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年 NPP 最大差值分别为 79.61、174.75、77.25 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,整体波动范围较小。③从图 3d-3f 可知三个草地群落 NEP 年均值分别为 6.63、4.85、4.17 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,波动范围分别在 $-16.6 \sim 39.7$ 、 $-55.99 \sim 77.79$ 、 $-30.61 \sim 24.17$ $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,总体波动较大,且多年 NEP 累计值分别为 99.49、72.77、41.70 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,说明库区草地群落具有较强固碳能力和碳汇功能。

以上草地群落 NPP、NEP 的年际变化趋势受到水热因子耦合作用的驱动。①雀梅藤群落海拔较高,年均温较低,导致多年植被 NPP 平均值较低 ($313.88 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),然而低温也使得植被自养呼吸和异养呼吸消耗降低,因此多年平均 NEP 和 NEP 多年累积量都高于同地区的芒草群落,碳汇功能明显。②受 1999、2004 年洪涝灾害的影响,区域降水量超过了植被最佳生长水分条件,光合作用效率降低,导致雀梅藤群落 NPP 在 1999 年最低,扭黄茅群落 NPP 在 2004 年降低;同时,过量的降水导致植被异养呼吸消耗量增加,使得扭黄茅群落 NEP 在 2004 年最低 ($-30.61 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),表现出明显的碳源作用。③受 2006 年高温伏旱的影响,降水减少且蒸散量增加,限制了植被的生产能力,导致芒草和扭黄茅群落 NPP 在 2006 年最低,分别为 500.76、492.57 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 3b,c);由于高温导致植被气孔关闭,植被呼吸作用消耗减少,使得芒草和扭黄茅群落 NEP 在 2006 年达到峰值 (77.79、24.17 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),碳汇作用明显 (图 3e,f)。

2.4 NPP、NEP 年际变化与气候因子的相关性分析

图 4 表示 NPP、NEP 与气候因子的关系。①雀

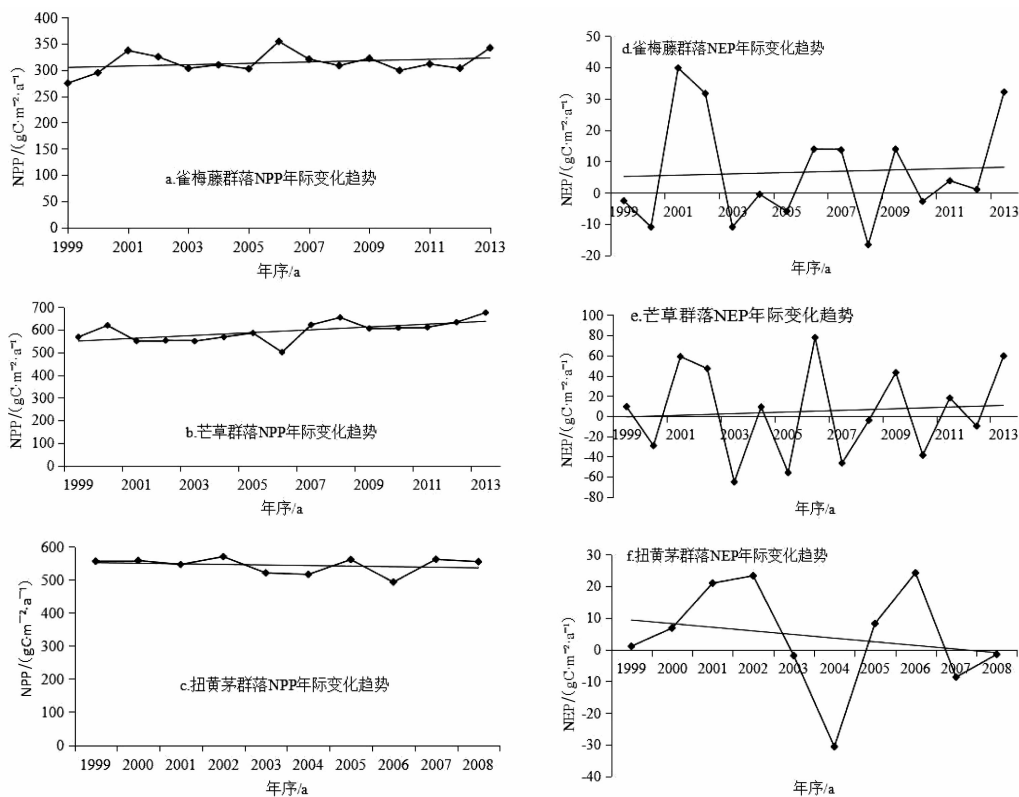


图 3 NPP、NEP 年际变化趋势

Fig. 3 Annual change trends of NPP and NEP

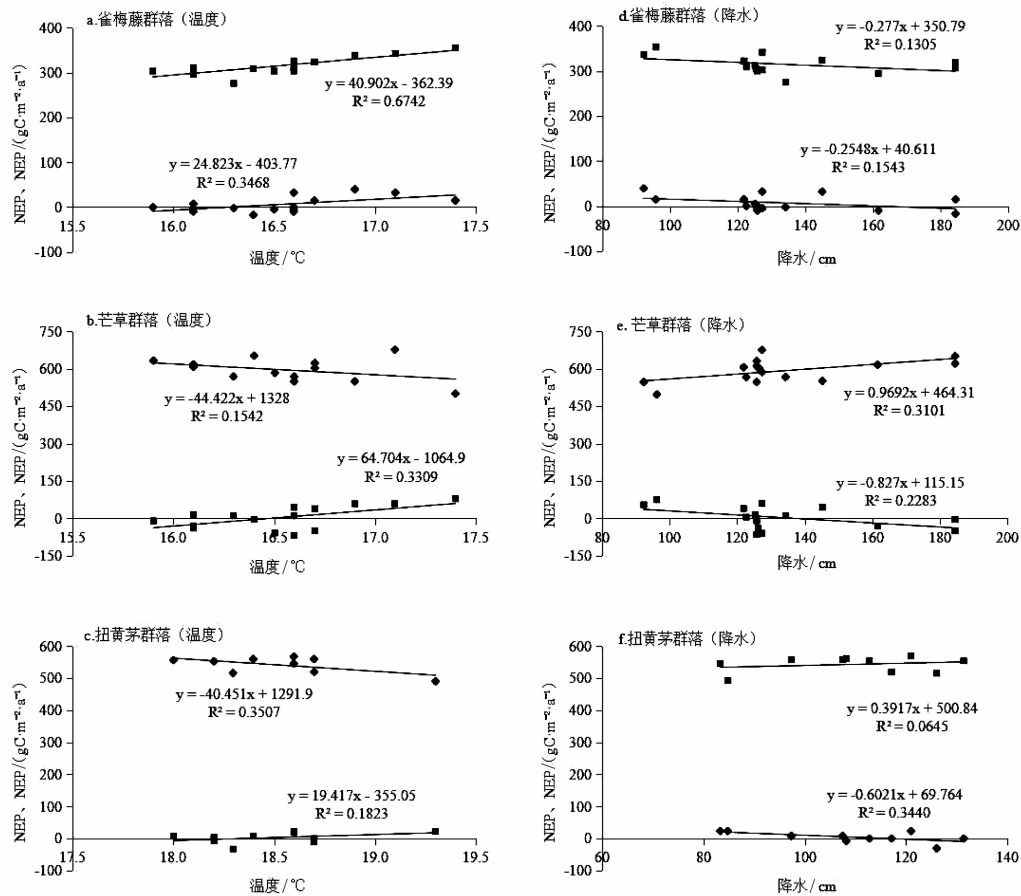


图4 NPP、NEP 与气候因子的关系

Fig. 4 Correlations between NPP (or NEP) and climatic conditions

梅藤群落 NPP 伴随温度升高而波动上升,随降水量增加而波动下降;且 NPP 受温度的影响更明显 ($R^2 = 0.67 > R^2 = 0.13$),这与雀梅藤群落地区海拔较高,年均温较低,降水量充足,因此低温是植被生长的限制因子,这与张懿锂等^[3]的研究结论一致。②芒草群落和扭黄茅群落的 NPP 随温度升高呈波动下降趋势、伴随降水量增加呈波动上升趋势;分析原因可能是两地海拔相对较低,常年平均气温较高,热量条件较好,而降水量的增加相对于温度更有利于植被生物量的积累。③三个草地群落 NEP 均随温度升高而波动上升,伴随降水量增加波动下降,其中雀梅藤群落、芒草群落 NEP 受温度影响显著 ($R^2 = 0.35 > 0.33 > 0.18$),而扭黄茅群落受降水量影响波动下降趋势更加明显 ($R^2 = 0.15 < 0.23 < 0.34$);④NEP 受到水热条件和植被本身呼吸作用的耦合影响,从③可以看出温度升高对于物质积累的作用大于植被呼吸作用的消耗,促进生态系统 NEP 波动上升;而三峡库区本身降水量充沛,降水量的进一步增加促进植被异养呼吸消耗增加,导致 NEP 累积量

反而减少,说明库区降水量对 NEP 的影响较小。

2.5 总碳储存量的年际动态变化分析

陆地生态系统有机碳储存量也是客观评价生态系统生态安全的重要因素之一,主要分为植被碳储量、凋落物碳储量、土壤碳储量^[32]。从图 5a-5c 可以看出三个草地群落多年平均碳储量分别为 2265、3383、2924 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,多年累计碳总量分别为 33 979、50 750、29 236 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年际变化波动范围小,固碳能力稳定。草地群落碳储量在植被、凋落物、土壤的分配比例(图 5d-5f),其中雀梅藤群落为 3.75% (85 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、9.27% (210 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、86.98% (1970 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),芒草群落为 2.99% (101 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、8.04% (272 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、88.97% (3010 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),扭黄茅群落为 3.18% (93 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、7.73% (226 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、89.09% (2605 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。统计结果表明草地群落的土壤碳储量最大,占总有机碳储量 85%~90%;其次凋落物储量比例为 8%~10%;植被碳储量最少占 3%~4%。并

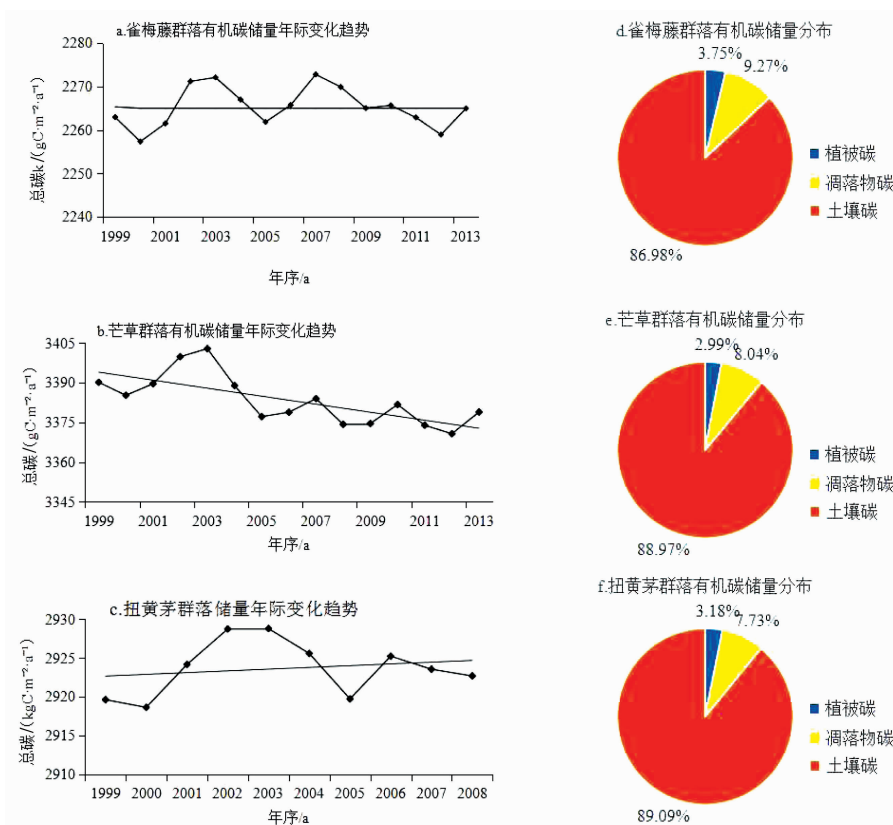


图 5 年均碳储量分布及变化趋势

Fig. 5 Distribution and trend of annual carbon stock

且多年碳储量变化波动小,说明库区草地群落具有丰富的碳储量及稳定的固碳能力,而同地区的芒草群落碳储量是雀梅藤群落的 1.5 倍,这也反应出气候水热、地形、植被类型的空间差异对碳循环的影响。

3 讨论与结论

三峡库区作为中国乃至全球独特的生态系统之一,库区草地群落的碳源/汇功能对区域生态系统安全和社会经济发展具有重要意义。本文基于 BIOME-BGC 模型,选取三个典型草地群落,估算其植被 NPP、NEP 和有机碳储量,并揭示其年际变化特征及其对水热条件的响应,研究结果表明:

(1) 三峡库区草地植被 NPP 和 NEP 呈现倒 U 型,夏季值最大,冬春季值最低,库区草地群落年内呈碳源—碳汇—碳源的变化特征。

(2) 三个草地群落多年 NPP 均值分别为 313.88 、 593.57 、 $543.52 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, NEP 均值分别为 6.63 、 4.85 、 $4.17 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; NPP 年际变化呈波动上升趋势,年际 NEP 波动较大,但多年 NEP 总累积量为正,表明库区草地群落具有明显的

碳汇功能。

(3) 三个典型草地群落 NPP、NEP 对水热因子响应存在明显差异,其中雀梅藤群落 NPP 与温度呈显著正相关,与降水量呈负相关;芒草群落、扭黄茅群落 NPP 与温度均呈负相关,与降水量呈正相关;三个草地群落的 NEP 与温度均呈正相关,与降水量均呈负相关。三峡库区常年温度较高且降水丰富但空间分布差异大,其中雀梅藤群落海拔较高,温度是植被生物量积累的限制因子,在海拔相对较低的芒草群落和扭黄茅群落,降水增加对植被 NPP 的促进作用更加显著。水热条件对植被 NEP 影响较复杂,三峡库区常年温度较高,高温条件下植被气孔关闭,生长呼吸消耗减少,有利于有机物的积累;但大量的降水会导致植被异养呼吸消耗增加,不利于有机物的积累。

(4) 三个草地群落多年碳储量波动范围较小,且多年碳累积量大分别为 $33\ 979$ 、 $50\ 750$ 、 $29\ 236 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在有机碳储量空间分配上,土壤碳储量比例最大,植被碳储量最小。因此,采取合理有效的措施减少库区水土流失对保障库区碳循环稳定及区域生态安全具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] 於利, 朴世龙. IPCC 第五次评估报告对碳循环及其它生物地球化学循环的最新认识[J]. 气候变化研究进展, 2014, **10**(1): 33–36 [YU Li, PIAO Shilong. Key scientific points on carbon and other biogeochemical cycles from the IPCC fifth assessment report [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, **10**(1): 33–36]
- [2] 郭群, 李胜功, 胡中民等. 内蒙古温带草原典型草地生态系统生产力对水分在不同尺度时间上的响应[J]. 中国沙漠, 2015, **35**(3): 616–623 [GUO Qun, LI Shengong, HU Zhongming, et al. Response of gross primary productivity to water availability at different temporal scales in a typical in Inner Mongolia temperate steppe[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, **35**(3): 616–623]
- [3] 张德铨, 祁威, 周才平等. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J]. 地理学报, 2013, **68**(9): 1197–1211 [ZHANG Yili, QI Wei, ZHOU Caiping, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production(NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009 [J]. *Acta Geographical Sinica*, 2013, **68**(9): 1197–1211]
- [4] 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, OU Yanghua, et al. A carbon budget of alpine steppe area in the Tibetan Plateau[J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(1): 102–110]
- [5] LIETH H. Modeling the primary productivity of the world[J]. *Primary Productivity of the Biosphere*, 1975, **14**(1): 237–263
- [6] BRADFORD J B, HICKE J A, LAUENROTH W K. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **96**(2): 246–255
- [7] 高清竹, 万运帆, 李玉娥等. 基于 CASA 模型的藏北地区草地植被净第一性生产力及其时空格局[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(11): 2526–2532 [GAO Qingzhu, WAN Yunfan, LI Yue, et al. Grassland net primary productivity and its spatial temporal distribution in Northern Tibet: A study with CASA mode [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(11): 2526–2532]
- [8] MELILLO J M, MCGUIRE A D. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 1993, **363**(6426): 363: 234–240
- [9] PARTON W J, SCURLOCK J M O, OJIMA D S et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biomass worldwide [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(4): 785–890
- [10] 赵德华, 李建龙, 齐家国等. 陆地生态系统碳平衡主要研究方法评述[J]. 生态学报, 2006, **26**(8): 55–62 [ZHAO Dehua, LI Jianlong, QI Jianguo, et al. An overview of current methods to estimate carbon budget of terrestrial ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(8): 55–62]
- [11] WHITE M A, THORNTON P E, RUNNING S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls[J]. *Earth Interactions*, 2000, **4**(3): 1–85
- [12] 何丽鸿, 王海燕, 雷海东. 基于 BIOME-BGC 模型的长白山落叶松林净初级生产力模拟参数敏感性[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(2): 412–420 [HE Lihong, WANG Haiyan, LEI Haidong. Parameter sensitivity of simulating net primary productivity of *Larix olgensis* forest based on BIOME-BGC model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(2): 412–420]
- [13] 王超, 延晓冬, 黄耀等. 应用 BIOME-BGC 模型研究典型生态系统的潜热通量一半干旱地区吉林通榆的模拟[J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(3): 404–412 [WANG Chao, YAN Xiaodong, HUANG Yao, et al. With BIOME-BGC model on the latent heat fluxes of the typical ecosystem: Simulations in semi-arid area at Tongyu, Jilin province[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, **11**(3): 404–412]
- [14] 朱士华, 张弛, 李超凡. 基于 BIOME-BGC 模型的新疆牧区生态系统碳动态模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2016, **30**(6): 159–166 [ZHU Shihua, ZHANG Chi, LI Chaofan. Modeling the carbon dynamics of the pastures ecosystem in Xinjiang with Biome-BGC model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, **30**(6): 159–166]
- [15] 刘春霞, 李月臣, 杨华等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. 地理学报, 2011, **66**(5): 631–642 [LIU Chunxia, LI Yuechen, YANG Hua, et al. RS and GIS-base assessment for eco-environmental sensitivity of the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **66**(5): 631–642]
- [16] 曾立雄, 王鹏程, 肖文发等. 三峡库区植被生物量和生产力的估算及分布格局[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3807–3815 [ZENG Lixiong, WANG Pengcheng, XIAO Wenfa, et al. Estimating vegetation biomass and productivity and their distribution patterns in the Three Gorges Reservoir region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3807–3815]
- [17] 肖文发, 唐石鹏, 雷静品等. 三峡库区森林植被气候生产力模拟[J]. 生态学报, 2014, **34**(11): 3064–3070 [XIAO Wenfa, TANG Shipeng, LEI Jingpin, et al. Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(11): 3064–3070]
- [18] 李月臣, 简太敏, 何志明等. 1998–2007 年三峡库区(重庆段)植被净第一性生产力及其时空特征[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, **29**(3): 61–65 [LI Yuechen, JIAN Taimin, HE Zhiming, et al. Spatial temporal dynamics of net primary productivity of the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing during 1998–2007[J]. *Journal of Chongqing Normal University(Natural Science)*, 2012, **29**(3): 61–65]
- [19] 杨振林, 石培礼, 闫巍等. MTCLIM 模型日平均温度调和系数获得算法的改进[J]. 生态学报, 2007, **27**(06): 2403–2409 [YANG Zhenlin, SHI Peili, YAN Wei, et al. Improvement of algorithm for MTCLIM in evaluation of daily mean in mountainous districts[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(06): 2403–2409]
- [20] KIMBALL J S, RUNNING S W, NEMANI R. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **85**(1–2): 87–98

- [21] 韩其飞, 罗格平, 李超凡等. 基于 Biome-BGC 模型的天山北坡森林生态系统碳动态模拟[J]. 干旱区研究, 2014, **31**(3): 375 – 380 [HAN Qifei, LUO Geping, LI Chaofan, et al. Simulation of carbon trend in forest ecosystem in northern slope of the Tianshan mountains based on Biome-BGC model[J]. Arid Zone Research, 2014, **31**(3): 375 – 380]
- [22] CHEN J M, LIU J, CIHLAR J, et al. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications[J]. Ecological Modelling, 1999, **124**(2): 99 – 119
- [23] WANG J, LIU J, CAO M, et al. Modelling carbon fluxes of different forests by coupling a remote-sensing model with an ecosystem process model [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, **32**(21): 6539 – 6567
- [24] 张廷龙, 孙睿, 胡波等. 改进 BIOME-BGC 模型模拟哈佛森林地区水、碳通量[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(9): 2099 – 2106 [ZHANG Tinglong, SUN Rui, HU Bo, et al. Simulation of water and carbon fluxes in Harvard forest area by using improved Biome-BGC model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(9): 2099 – 2106]
- [25] 董明伟, 喻梅. 沿水分梯度草原群落 NPP 动态及对气候变化响应的模拟研究[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(3): 531 – 543 [DONG Mingwei, YU Mei. Simulation analysis on net primary productivity of grassland communities along a water gradient and their responses to climate change[J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2008, **32**(3): 531 – 543]
- [26] 孙政国, 陈奕兆, 居为民等. 我国南方不同类型草地生产力及对气候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(4): 609 – 616 [SUN Zhengguo, CHEN Yizhao, JU Weimin, et al. Productivity of different types of grassland plots and their responses to climate change in the Southern China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, **24**(4): 609 – 616]
- [27] WHITE M A, THORNTON P E, RUNNING S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls. Earth Interactions, 2000, **4**(3): 1 – 84
- [28] 高清竹, 万运帆, 李玉娥等. 藏北高寒草地 NPP 变化趋势及其对人类活动的响应[J]. 生态学报, 2007, **27**(11): 4612 – 4619 [GAO Qingzhu, WAN Yunfan, LI Yue, et al. Trends of grassland NPP and its response to human activity in Northern Tibet[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(11): 4612 – 4619]
- [29] 孙庆龄, 冯险峰, 刘梦晓等. 武陵山区植被净初级生产力遥感模拟与分析[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(10): 1628 – 1641 [SUN Qinglin, FENG Xianfeng, LIU Mengxiao, et al. Estimation and analysis of net primary productivity in Wuling mountainous area based on remote sensing[J]. Journal of Natural Resources, 2015, **30**(10): 1628 – 1641]
- [30] FENG X F, LIU G H, CHEN J M, et al. Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing [J]. Journal of Environment Management, 2007, **85**(3): 563 – 573
- [31] 陶波, 李克让, 邵雪梅等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. 地理学报, 2003, **58**(3): 372 – 380 [TAO Bo, LI Kerang, SHAO Xuemei, et al. Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, **58**(3): 372 – 380]
- [32] 张新厚, 范志平, 孙学凯等. 半干旱土地利用方式变化对生态系统碳储量的影响[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(12): 2424 – 2430 [ZANG Xinhou, FAN Zhiping, SUN Xuekai, et al. Effects of land use change on ecosystem carbon stock in semi-arid region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, **28**(12): 2424 – 2430]
- [33] 程春晓, 徐宗学, 王志慧等. 2001—2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析[J]. 资源科学, 2014, **36**(11): 2401 – 2412 [CHENG Chunxiao, XU Zongxue, WANG Zhihui, et al. Temporal-spatial change simulation and analysis of net primary productivity in Northeast China from 2001 to 2010 [J]. Resources Science, 2014, **36**(11): 2401 – 2412]
- [34] 杨柏娟, 王思远, 常清等. 青藏高原植被净初级生产力对物候变化的响应[J]. 地理与地理信息科学, 2015, **31**(5): 115 – 120 [YANG Baijuan, WANG Siyuan, CHANG Qing, et al. Response of NPP to phenology changes in the Tibet Plateau [J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, **31**(5): 115 – 120]

Dynamic Changes of Carbon Source and Sink in Different Grassland Communities in Three Gorges Reservoir Area Based on BIOME-BGC Model

ZHOU Wei*, HE Shunbing, YANG Han, HE Xugang, MU Fengyun

(Department of Geography and Land Resources, College of Architecture and Urban Planning,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In this paper, three typical grassland communities, the meteorological data and the basic data (longitude and latitude, elevation, vegetation type, soil texture, etc.) were applied to estimate grassland NPP, NEP and carbon(C) storage in the Three Gorges reservoir area from 1999 to 2013 based on the BIOME-BGC model. Meanwhile, the interannual and seasonal change, and the correlations between vegetation NPP, NEP and temperature, precipitation were explored. Results indicated that the annual variation of vegetation NPP and NEP presented inverted U-shape, and reached maximum in July and August, showing obvious changing characteristics from C source to C sink and then to C source. The average NEP of three grassland communities were 6.63, 4.85 and 4.17 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, showing obvious C sink function. There was a significant positive correlation between NEP and temperature, and negative correlation with the precipitation. And the diverse responses of the NPP of different grassland communities to hydrothermal factors were obvious. The total C storage of the three grassland communities were 33 979, 50 750, 29 236 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$. Besides, soil organic C stock was the largest one, accounting for 85% to 90% of the total; and the vegetation C storage was the least one, accounting for about 3% to 4%.

Key words: carbon sink; grassland community; BIOME-BGC model; carbon cycle; Three Gorges reservoir area