

官厅水库小流域植被净初级生产力估算

官兆宁¹, 熊凯², 孙伟东³, 李惠敏^{1,4*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037;
3. 北京市顺义区生态环境局, 北京 101300; 4. 航天宏图信息技术股份有限公司研究院, 北京 100195)

摘要: 植被是小流域的物质基础, 植被净初级生产力的稳定性关系到小流域的健康和可持续发展。以官厅水库小流域为研究区, 采用改进型CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型, 利用2005年、2010年和2015年以及邻近年份的每年3~11月的Landsat TM/ETM+/OLI影像数据, 估算官厅水库小流域植被净初级生产力, 考虑到植物的物候特征, 在模型计算过程中, 引入归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)时间序列特征, 提取地物信息, 从而提高了改进型CASA模型中植被最大光能利用率使用范围的准确度。研究结果显示, 2005年、2010年和2015年官厅水库小流域植被净初级生产力的总量分别为 6.33×10^8 g碳、 6.73×10^8 g碳和 7.37×10^8 g碳。

关键词: 植被; 净初级生产力; 改进型CASA模型; NDVI时间序列

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5948(2021)03-285-10

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)对于环境保护、土地利用、粮食安全和生态建设等政策制定意义重大^[1-4], 已经成为全球陆地生态系统碳循环的重要研究内容之一^[5-7]。作为陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 植被净初级生产力能表征自然条件下植被的生产能力和固碳能力, 反映生态系统质量, 也可以作为评价生态系统可持续性的重要指标。国际地圈-生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)和京都协议(Kyoto protocol)等重要研究计划都将生态系统植被净初级生产力作为核心研究内容之一^[8]。快速、准确地估算小流域植被净初级生产力, 对研究小流域碳存储及其对气候变化的影响, 具有重要意义。

植被净初级生产力是指绿色植物在单位时间、单位面积内所累积有机物数量, 是从绿色植物光合作用所产生的有机质总量(gross primary productivity, GPP)中减去自养呼吸(auto-trophic respiration, RA)后的剩余部分, 也被称为净第一生产

力^[9]。植被净初级生产力表征植物光合作用和转化光能合成物的效率, 其数值大小能反映出植物本身的生长和健康状态以及其外部环境的压力。

20世纪末, 多采用统计模型、参数模型和生态系统过程模型^[10], 估算大尺度区域的植被净初级生产力。采用统计模型估算植被净初级生产力, 主要是通过建立气温和降水量等要素与植物干物质生产力间的拟合模型来实现^[11]。随着遥感技术的发展与应用, 利用植被指数等遥感数据和实测的植物生产力数据, 建立经验统计模型, 估算区域植被净初级生产力^[12]。但是, 对于其它生态系统和其它区域, 经验统计模型不具有普适性^[10]。参数模型, 亦称光能利用率模型, 以光能作为陆地生命的基本能量来源, 依据资源平衡的观点, 利用植物所吸收的光合有效辐射(absorbed photosynthetically active radiation, APAR)和相关调控因子, 来估算区域的植被净初级生产力^[13]。目前, CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)和GLO-PEM(GLObal Production Efficiency Model)等参数模型

收稿日期: 2020-06-23; 修订日期: 2021-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971381)和北京市水务局重点项目(TAHP-2018-ZB-YY-490S)资助。

作者简介: 官兆宁(1972-), 女, 山东省青岛人, 博士, 教授, 从事湿地遥感研究。E-mail: gongzhn@cnu.edu.cn

*通讯作者: 李惠敏, 工程师。E-mail: lihuimin@piesat.cn。

应用较多,这些模型以植物光合作用机制为理论基础,利用地面实测数据进行验证,与统计模型相比,参数模型所利用的实测数据较少,而且随着遥感技术的发展,参数模型中的很多参数都可以通过遥感手段获取,便于推广,有较强普适性。例如,利用CASA模型,模拟了加利福尼亚地区碳收支^[14];估算了2000~2009年若尔盖湿地的植被净初级生产力^[15]。根据植物生长和发育的生理、生态学过程,通过模拟植物的光合作用、呼吸作用、蒸腾蒸散和土壤微生物分解过程等,结合气象、土壤和植物生理参数等数据,建立生态系统过程模型,估算了中国草地的植物净初级生产力^[16]。但是,因为生态系统过程模型的原理比较复杂,所以在其应用过程中需要的参数也比较多,其并不适用于植被净初级生产力的快速遥感监测。

生态系统的稳定性是指生态系统应对外界因素干扰的承载能力,是生态系统适应外界因素波动的能力表现^[17]。反映生态系统生产能力的指标有植被初级生产力、净初级生产力、植物地上生物量和植被指数等,其中,植被净初级生产力是最能反映陆地生态系统生产能力的指标^[18-20]。将植被净初级生产力作为衡量植物能量变化的指标,能够从生态系统初始能量的角度分析生态系统的稳定性变化。

目前,中国有210座面积大于10 km²的淡水湖泊^[21]。在人口密集、经济发达的华北平原,湖泊、水库是主要的湿地类型。地处温带亚湿润与中温带干旱区过渡地带的官厅水库具有重要的生态功能,由于其靠近人口密集的大城市,受人类社会影响明显,气候要素波动大。2001年至2015年期间,官厅水库的小流域经历了破坏、治理和发展阶段,是研究小流域恢复、保护、开发方案制定的首选区域。随着国家“生态文明建设”战略部署的提出,官厅水库小流域湿地生态系统的保护工作已经逐步开展,2006年,建立了北京野鸭湖国家湿地公园。

水位变化对小流域中的植物影响较大,通常在一年内就能出现植物群落的演替过程。在采用改进型CASA模型研究植被净初级生产力的过程中,多数研究利用某一时刻的遥感影像提取地物信息,忽视了植物的物候特征,导致模型中确定不

同类型植物的最大光能利用率适用范围出现误差。

本研究采用改进型CASA模型,利用2005年、2010年和2015年植物生长季(9个月)研究区的27景Landsat遥感影像,估算官厅水库小流域的植被净初级生产力,在原有CASA模型的基础上进行地表覆被类型提取时,参考研究区植物生长季归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)时间序列特征,改进原有CASA模型中关于地表覆被类型信息的提取方法,计算出2005年、2010年和2015年官厅水库小流域逐月和全年的植被净初级生产力总量,并以植被净初级生产力为特征指标,对研究区生产力稳定性进行定性分析。

1 数据和方法

1.1 研究区

官厅水库小流域(39°N~40°N, 112°E~117°E)地处温带亚湿润华北平原向内蒙高原中温带干旱过渡地带。该区气候属温带大陆性季风气候,年平均气温为10.1℃,年降水量为350~500 mm,年蒸发量为1 200~1 400 mm,60%~70%的降水量集中于夏季,且多暴雨。官厅水库是新中国建立后修建的第一座大型水库,是根治永定河水患的重点工程^[22],水库运行40多年来,在防洪、发电、灌溉、供水等方面一直发挥巨大作用^[23]。

采用水文学上的汇水区计算方法,利用官厅水库的数字高程模型数据,利用ArcGIS 10.2软件中的汇水区计算模块,得到官厅水库小流域的分布范围(图1)。

1.2 数据

本研究利用了2005年、2010年和2015年以及邻近年份的每年3~11月的Landsat TM/ETM+/OLI影像数据(表1),开展研究。27景影像数据的空间分辨率都为30 m,重访周期为16 d。对所利用的遥感影像,进行了辐射定标、大气校正和影像裁剪等预处理。

1.3 植被净初级生产力估算方法

可以利用光能利用率模型^[13],估算植被净初级生产力,也可以利用CASA模型^[14],反演植被净初级生产力。本研究利用了改进型CASA模型,

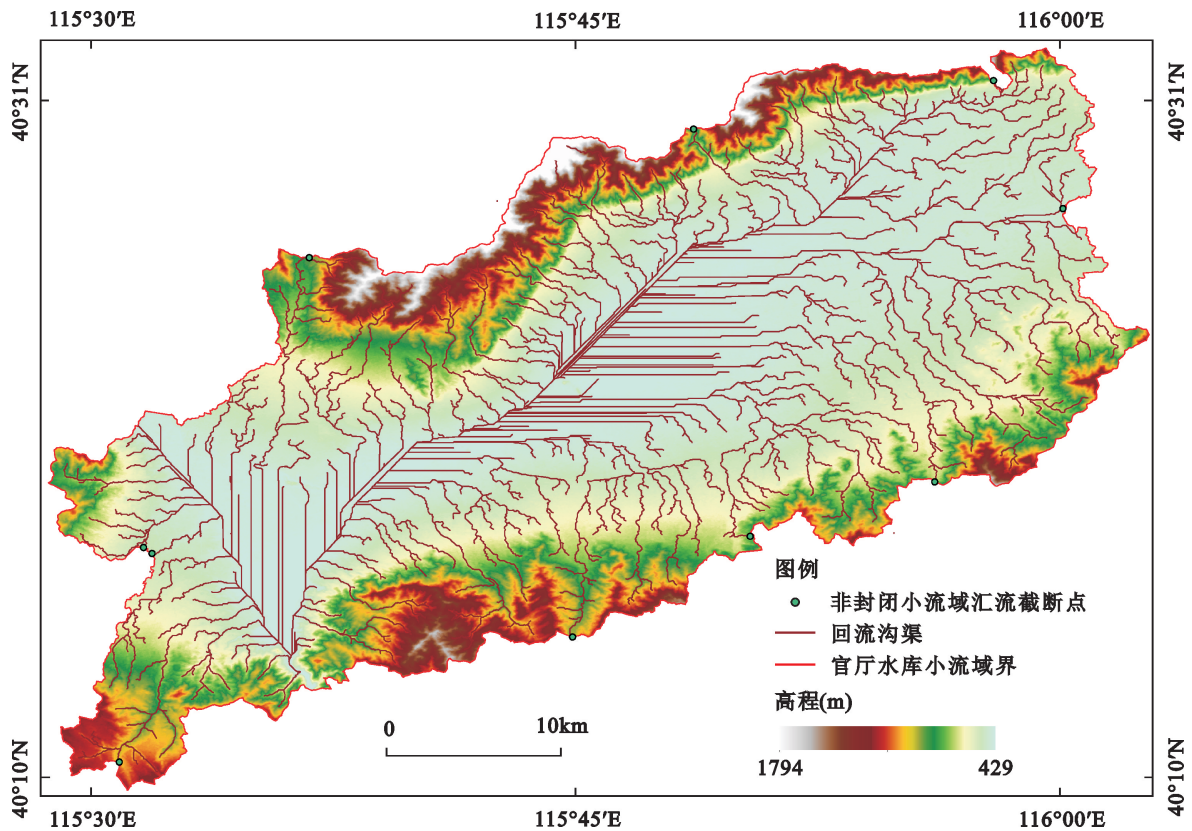


图1 官厅水库小流域示意图

Fig.1 Sketch map of Guanting Reservoir small watershed

表1 本研究利用的遥感影像数据信息

Table 1 Data information of remote sensing images used in the study

影像数据 序号	数据标识号	成像时间 (年-月-日)	云量 (%)	影像数据 序号	数据标识号	成像时间 (年-月-日)	云量 (%)
1	LT51240322005085BJC00	2005-03-26	0.01	15	LT51240322010227IKR00	2010-08-15	7.15
2	LT51240322005101BJC00	2005-04-11	32.40	16	LT51240322011262BJC00	2011-09-19	1.00
3	LT51240322007139IKR00	2007-05-19	1.00	17	LT51240322009288IKR01	2009-10-15	0.00
4	LT51240322005181BJC00	2005-06-30	4.53	18	LT51240322010355BJC00	2010-12-21	1.00
5	LT51240322004195BJC00	2004-07-13	35.00	19	LC81240322015065LGN00	2015-03-06	7.34
6	LT51240322004243BJC02	2004-08-30	0.03	20	LC81240322015097LGN00	2015-04-07	0.05
7	LT51240322005245BJC00	2005-09-02	13.04	21	LC81240322015145LGN00	2015-05-25	0.06
8	LT51240322006296IKR00	2006-10-23	0.00	22	LC81240322014174LGN00	2014-06-23	7.19
9	LT51240322005325HAJ00	2005-11-21	0.83	23	LC81240322015193LGN00	2015-07-12	2.31
10	LT51240322011086IKR01	2011-03-27	0.00	24	LC81240322015225LGN01	2015-08-13	2.01
11	LT51240322009096BJC00	2009-04-06	0.00	25	LC81240322015257LGN00	2015-09-14	3.39
12	LT51240322009128IKR01	2009-05-08	10.00	26	LC81240322015289LGN02	2015-10-16	0.01
13	LT51240322009176IKR00	2009-06-25	0.00	27	LC81240322015305LGN00	2015-11-01	0.21
14	LT51240322008206BJC00	2008-07-24	0.43				

估算研究区植被净初级生产力。

研究表明,对于广东省的植被而言,CASA模型中所使用的全球植被月最大光能利用率(0.389 g/MJ碳)明显偏低^[24]。本研究在利用CASA模型时,参照了文献[25]中的全球植被月最大光能利用率取值,即林地、有林草地、农用地、灌丛草地、裸地和稀疏植被的最大光能利用率分别为0.572 g/MJ碳、0.557 g/MJ碳、0.608 g/MJ碳、0.541 g/MJ碳、0.541 g/MJ碳。

1.4 基于NDVI时间序列的地物信息提取

本研究构建了研究区地物分类体系,以遥感数据和水文地貌信息为基础,提取相关特征因子,选取训练样本;采用分类回归树方法,提取决策树规则;采用基于多尺度分割的面向对象分类方法,提取出研究区的地物信息。

1.4.1 地物分类

参照湿地公约、全国湿地资源调查技术规程和土地利用现状分类标准,将研究区的土地划分为旱田(包括耕地、正常轮作的休闲地和轮歇地)、高林地(郁闭度大于30%、树高大于2 m的天然林和人工林)、矮林地(郁闭度大于40%、高度低于2 m的矮木林和灌丛)、草地(水分条件较好的覆盖度大于50%的天然草地、改良草地和割草地)、稀疏灌丛草地(水分一般的伴有稀疏灌丛的草地)、水库(包括水库水域和水利设施用地)、建筑用地(城乡居民点及其相关的工矿、交通等用地)和裸地(地表有土壤覆盖且植物覆盖度小于5%的土地)。

1.4.2 分类特征构建

根据典型植物各季节的生长特征,提取其归一化差值植被指数时间序列特征,选取指标,构建分类特征。

采用标准主成分分析方法,研究归一化差值植被指数时间序列特征。第一主成分能表现出全年的归一化差值植被指数综合特征;第二主成分反映的是冬季与夏季差异巨大的地物类型,低值区凸显旱地和茂盛草地的特征;第三主成分凸显水体和林地信息;第四主成分能够在一定程度上反映出植物生长旺季8月和9月有双峰曲线的植物覆盖的土地,例如,花卉、蔬菜等农用地以及生长季节性荣枯的水生植物的区域;第五主成分是典型的双峰曲线;而对比第二主成分与第九主成分,能够识别、区分旱地与茂盛草地。

根据研究区植物的物候特征,利用高分辨率的GeoEye卫星影像、GF-2卫星影像和谷歌地图等,进行目视判别,随机采样选取具有代表性、分布均匀且数量适宜的样本点集,提取样本点集的对特征值;在采用分类回归树的方法建立分类规则对植被类型进行分类前,先对样本点特征值进行筛选,过滤掉不相关的错误点,最终,得到样本点数量(表2)。

1.4.3 植被信息提取

本研究采用面向对象分类的影像分割算法,使参与决策树分类运算的单元从像素点变成同质的地物类块。

表2 采集的样本点数量

Table 2 Number of sample points collected

地物类型	2005年的样本点数量(个)		2010年的样本点数量(个)		2015年的样本点数量(个)	
	训练	测试	训练	测试	训练	测试
旱田	260	112	272	117	277	119
高林地	249	107	235	102	246	106
矮林地	203	88	210	90	197	85
草地	119	52	140	61	156	68
稀疏灌丛草地	168	73	147	64	142	61
水库	232	100	249	107	268	116
建筑用地	288	124	291	125	284	122
裸地	109	47	78	34	93	41
合计	1 628	703	1 622	700	1 663	718

利用 eCognition 8.7 软件,对影像进行多尺度分割,分割参数包括尺度、形状和紧密度参数。在进行影像多尺度分割时,为了更多地利用影像的光谱特征,使用尽可能多的颜色标准和必要的形状标准,使生成的影像对象具有最佳边界。

以 2015 年为例,将多时相 NDVI 影像及其主成分变换的第一至第五主成分输入。由于输入图像对于影像分割结果的重要性未知,将每一输入图层的权重都赋值为 1,分割处理的目的是适度的影像聚类,通过尝试不同的分割尺度、形状参数和紧密度因子,最后确定了分割尺度。以此类推,对 2005 年和 2010 年的影像进行了多尺度分割操作。2005 年、2010 年和 2015 年影像的输入图层数量分别为 8 层、9 层和 8 层,分割尺度分别为 20、15

和 15,形状参数都为 0.2,紧密度因子都为 0.9。

得到影像分割结果后,将选好的训练样本特征值分类导出,作为目标变量输入到 SPSS 25.0 软件中,运行 CART 算法,经过生长与剪枝后,最终生成决策树结构图。2015 年、2010 年和 2005 年的决策树深度都为 5 层,生成的叶子节点个数分别为 25 个、26 个和 23 个。依据决策树构建的分类规则,提取最终的分类结果,总分类正确率分别为 90.33%、92.98%和 93.12%。

1.5 胁迫因子

植物光合作用的胁迫因子为温度和湿度。

不同植物的光合作用的最低温度、最适温度和最高温度存在很大差异,研究区的植物以小麦、大豆等 C3 植物和乔木植物为主,而且冬季地表有

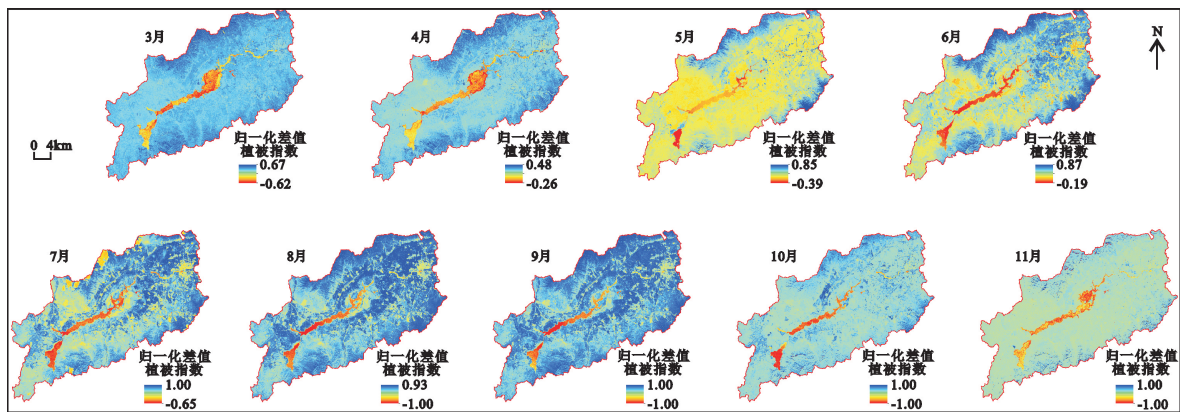


图2 2005年3月至11月官厅水库小流域的归一化差值植被指数分布图

Fig.2 Distribution map of normalized difference vegetation index in the small watershed of Guanting Reservoir from March to November in 2005

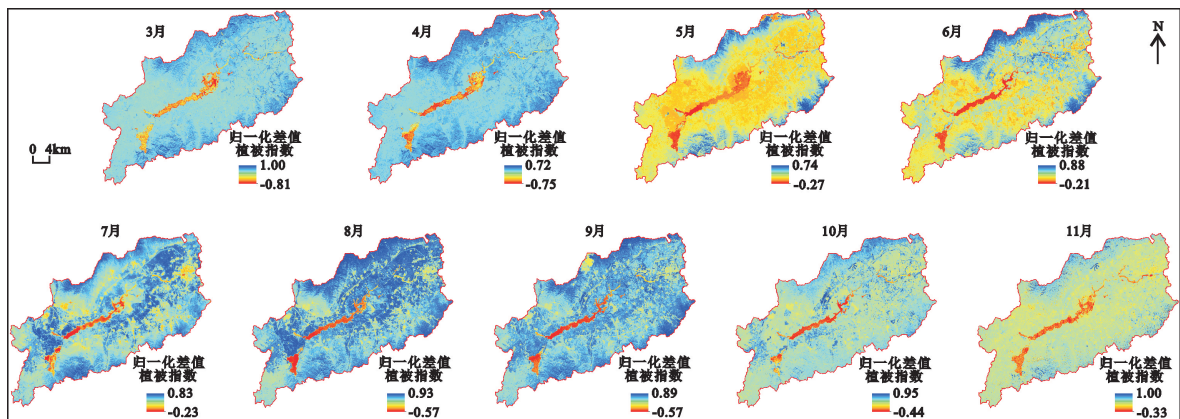


图3 2010年3月至11月官厅水库小流域的归一化差值植被指数分布图

Fig.3 Distribution map of normalized difference vegetation index in the small watershed of Guanting Reservoir from March to November in 2010

结冰现象,故将研究区内植物光合作用的最低温度、最适温度和最高温度设定为0℃、40℃和27℃。

潜在蒸散发是充分供水下的下垫面蒸发量,为了提高潜在蒸散发的反演精度,本研究采用彭曼公式计算植物的潜在蒸散发。

2 结果与分析

2.1 归一化差值植被指数的时间序列特征

归一化差值植被指数是研究植被的一个重要指标,改进型CASA模型中的地表覆被类型信息多是提取自研究区某一时刻的遥感影像,忽略了植物在不同生长期的特征。本研究通过提取2005年(图2)、2010年(图3)和2015年(图4)研究区3~11月的归一化差值植被指数分布信息,再根据归一化差值植被指数时间序列特征,提取地物信息,

从而提高改进型CASA模型中植被最大光能利用率使用范围的准确度。

水库小流域处在水、陆交替地带,水库的水文过程一直影响着其发育、演替的全过程;同时,植物群落特征和下垫面特性也影响着水库小流域的水文过程^[26]。图2、图3和图4显示,在官厅水库水域面积变化的条件下,植物呈现出不同的变化特征,并且在同一年中,归一化差值植被指数也呈现出明显的月变化。

2.2 土地利用类型分布

在利用改进型CASA模型估算官厅水库小流域植被初级净生产力的过程中,确定最大光能利用率是关键,而最大光能利用率的确定依赖于地物的提取结果。本研究采用一种非监督湿地分类方法^[27],利用归一化差值植被指数时间序列数据,提取出的地物信息,能够描述出官厅水库小流域

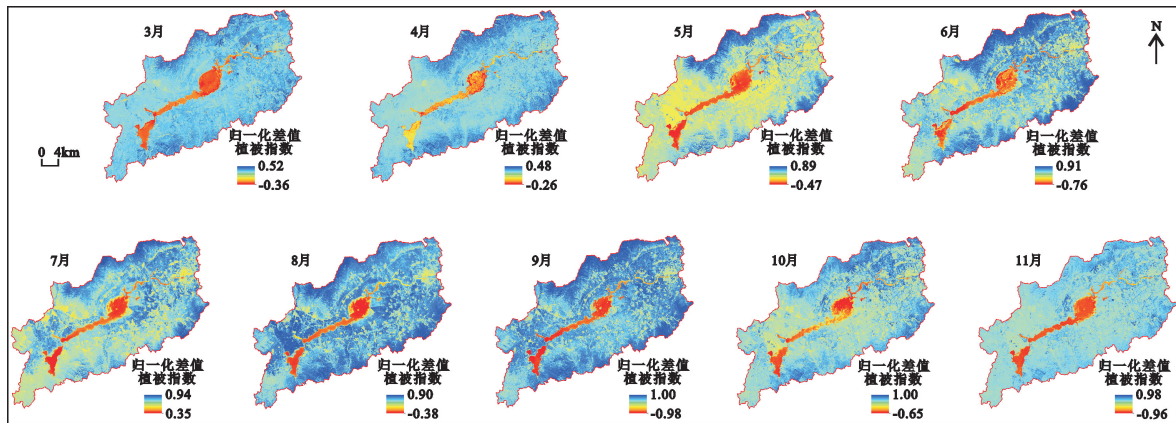


图4 2015年3月至11月官厅水库小流域的归一化差值植被指数分布图

Fig.4 Distribution map of normalized difference vegetation index in the small watershed of Guanting Reservoir from March to November in 2015

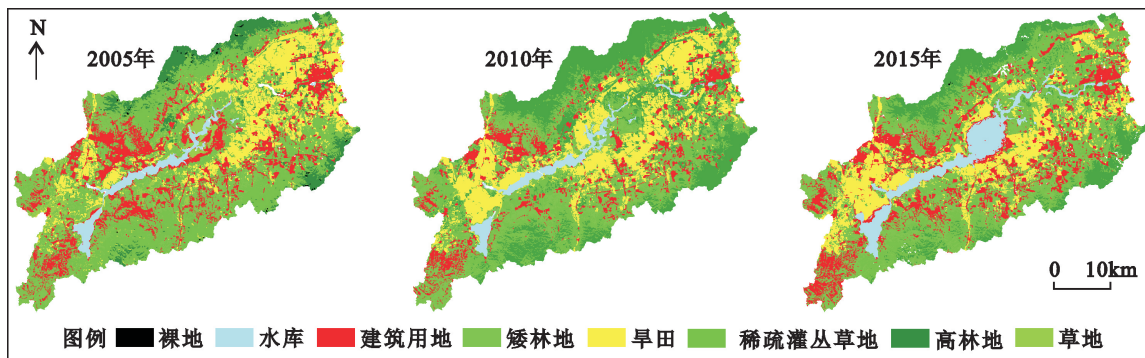


图5 2005年、2010年和2015年官厅水库小流域土地利用分布图

Fig.5 The map of land use of small watershed of Guanting Reservoir in 2005, 2010 and 2015

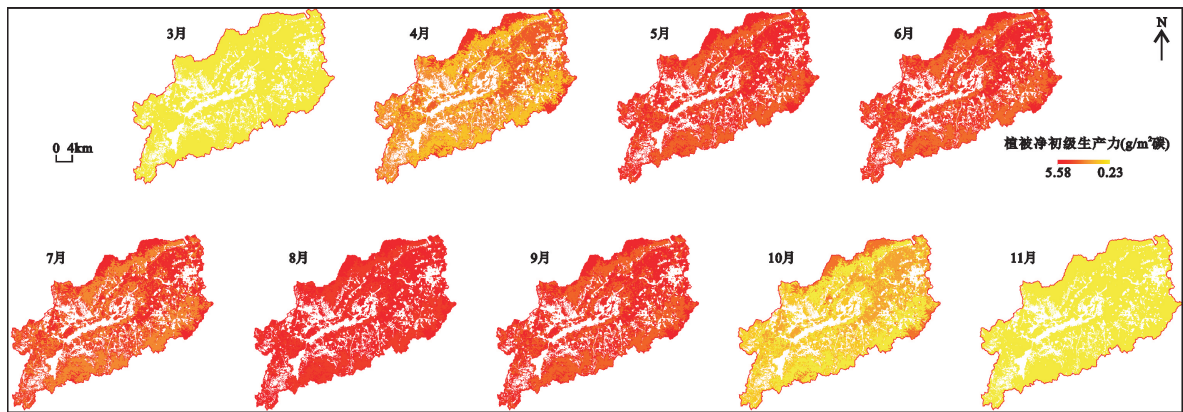


图6 2005年3月至11月官厅水库小流域的植被净初级生产力分布图

Fig.6 Distribution map of vegetation net primary productivity of small watershed of Guanting Reservoir from March to November in 2005

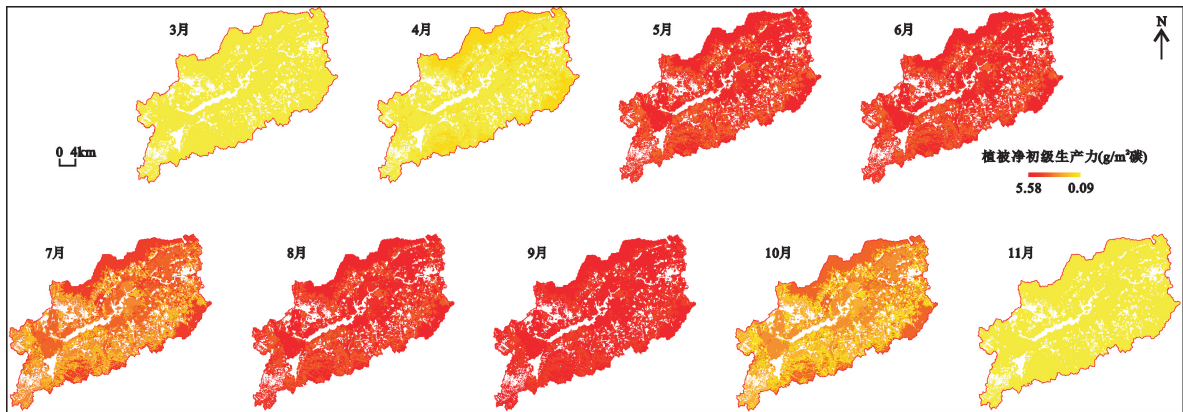


图7 2010年3月至11月官厅水库小流域的植被净初级生产力分布图

Fig.7 Distribution map of vegetation net primary productivity of small watershed of Guanting Reservoir from March to November in 2010

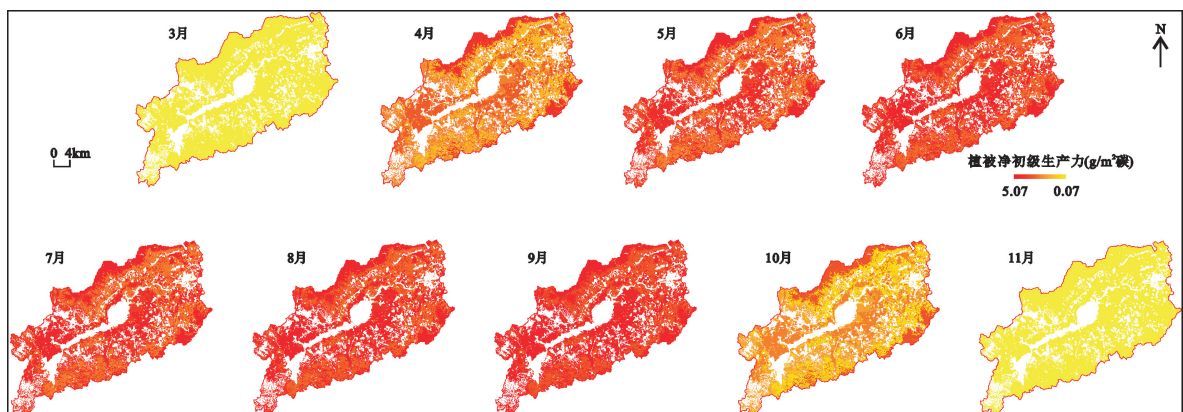


图8 2015年3月至11月官厅水库小流域的植被净初级生产力分布图

Fig.8 Distribution map of vegetation net primary productivity of small watershed of Guanting Reservoir from March to November in 2015

植物的年内变化情况。

官厅水库地处温带亚湿润与中温带干旱区的

过渡地带,植物资源丰富,同时具有盐生植物、中生植物和湿生植物,随着气候的波动,3种植物群

表3 2005年、2010年和2015年3月至11月官厅水库小流域的植被净初级生产力的最大值、最小值和平均值
Table 3 The maxima, minima and means of vegetation net primary productivity of small watershed of Guanting Reservoir from March to November in 2005, 2010 and 2015

项目	2005年3月至11月的植被净初级生产力(g/m ² 碳)									
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
最大值	0.59	3.11	4.48	4.28	3.90	5.58	4.51	2.55	0.37	
最小值	0.36	1.93	2.78	2.66	2.42	3.46	2.80	1.58	0.23	
平均值	0.44	2.35	3.39	3.24	2.95	4.22	3.41	1.93	0.28	
项目	2010年3月至11月的植被净初级生产力(g/m ² 碳)									
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
最大值	0.14	1.93	4.47	4.53	3.09	4.62	5.58	2.68	0.14	
最小值	0.09	1.20	2.77	2.81	1.91	2.86	3.46	1.66	0.09	
平均值	0.11	1.58	3.66	3.71	2.53	3.78	4.58	2.20	0.11	
项目	2015年3月至11月的植被净初级生产力(g/m ² 碳)									
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
最大值	0.79	3.40	4.26	4.64	4.43	4.75	5.07	3.03	0.12	
最小值	0.49	2.11	2.64	2.87	2.75	2.94	3.14	1.88	0.07	
平均值	0.62	2.65	3.33	3.62	3.46	3.71	3.96	2.37	0.09	

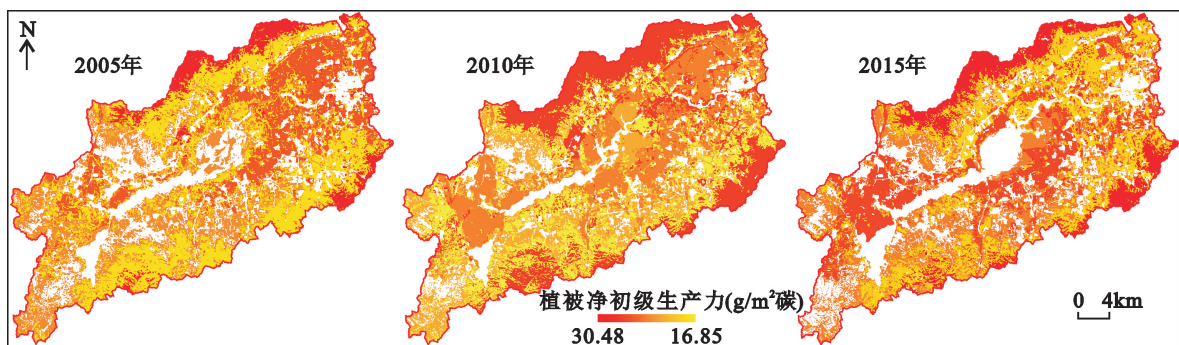


图9 2005年、2010年和2015年官厅水库小流域的植被净初级生产力分布图

Fig.9 Distribution map of vegetation net primary productivity of small watershed of Guanting Reservoir in 2005, 2010 and 2015

落在不断演替变化。官厅水库小流域地处河北省和北京市的交界处,作为北京市备用水源地,受人类活动的影响较大,具体体现为官厅水库水面面积的变化^[28],与2005年相比,2010年官厅水库的水面面积明显缩小,2015年其又明显扩大(图5);与2005年相比,2010年研究区的林地和旱田面积都明显增大,2015年研究区东北部的旱田绝大部分已经被草地所替代。

2.3 植被净初级生产力的分布特征

2.3.1 3月至11月的植被净初级生产力

图6、图7、图8和表3显示,2005年、2010年、

2015年3月至11月研究区的植被净初级生产力总体上都呈单峰型变化;植被净初级生产力的最大值出现在2010年9月(5.58 g/m²碳),最小值出现在2010年3月(0.07 g/m²碳)。

2.3.2 各年的植被净初级生产力

将2005年、2010年和2015年官厅水库小流域9个月的植被净初级生产力叠加计算,分别得出2005年、2010年和2015年研究区植被净初级生产力的空间分布特征(图9),2005年、2010年和2015年研究区植被净初级生产力的总量分别为 6.33×10^8 g碳、 6.73×10^8 g碳和 7.37×10^8 g碳,整体上呈递

增趋势。

3 结 论

2005年、2010年和2015年官厅水库小流域植被净初级生产力的总量分别为 6.33×10^8 g 碳、 6.73×10^8 g 碳和 7.37×10^8 g 碳。

参考文献

- [1]陶波,葛全胜,李克让,等.陆地生态系统碳循环研究进展[J].地理研究,2001,20(5):564-575.
- [2]王宗明,国志兴,宋开山,等.2000~2005年三江平原土地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究[J].自然资源学报,2009,24(1):136-146.
- [3]YIN Yuanyuan, TANG Qiuhong, WANG Lixin, *et al.* Risk and contributing factors of ecosystem shifts over naturally vegetated land under climate change in China[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-11.
- [4]YUAN Wenping, CHEN Yang, XIA Jiangzhou, *et al.* Estimating crop yield using a satellite-based light use efficiency model[J]. Ecological Indicators, 2016, 60(1): 702-709.
- [5]孟元可,叶许春,徐力刚,等.2000~2015年鄱阳湖区植被净初级生产力变化及驱动因素分析[J].湿地科学,2018,16(3):360-369.
- [6]郗延彪,任春颖,相恒星,等.2000~2015年辽河流域植被净初级生产力变化研究[J].湿地科学,2018,16(3):445-450.
- [7]国志兴,王宗明,宋开山,等.三江平原沼泽湿地植被净初级生产力空间变化特征分析[J].湿地科学,2008,6(3):372-378.
- [8]STEFFEN W, NOBLE I, CANADELL J, *et al.* The Terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol[J]. Science, 1998, 280(5368): 1393-1394.
- [9]蔡雨恋.三江源区净初级生产力(NPP)估算及对气候变化的响应[D].南京:南京信息工程大学,2010.
- [10]RUI MY 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(D3): 5263-5283.
- [11]赵金飞.基于遥感影像的草场可持续利用研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2011.
- [12]袁文平,蔡文文,刘丹,等.陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展[J].地球科学进展,2014,29(5):541-550.
- [13]MONTEITH J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747-766.
- [14]POTTER C. The carbon budget of California[J]. Environmental Science & Policy, 2010, 13(5): 373-383.
- [15]边金虎.基于RS和GIS的若尔盖湿地植被净初级生产力估算与时空分析[D].北京:中国科学院研究生院,2010.
- [16]张美玲,蒋文兰,陈全功,等.草地净第一性生产力估算模型研究进展[J].草地学报,2011,19(2):356-366.
- [17]柳新伟,周厚诚,李萍,等.生态系统稳定性定义剖析[J].生态学报,2004,24(11):2635-2640.
- [18]陈强,陈云浩,王萌杰,等.2001—2010年洞庭湖生态系统质量遥感综合评价与变化分析[J].生态学报,2015,35(13):4347-4356.
- [19]潘竟虎,董磊磊.2001—2010年疏勒河流域生态系统质量综合评价[J].应用生态学报,2016,27(9):2907-2915.
- [20]高翔,黄娉婷,王可.宁夏沙坡头干旱沙漠自然保护区生态系统稳定性评估[J].生态学报,2019,39(17):6381-6392.
- [21]姜加虎,黄群,孙占东.长江流域湖泊湿地生态环境状况分析[J].生态环境学报,2006,15(2):424-429.
- [22]甄姿,宫兆宁,赵文吉.官厅水库库区水生植物演变格局时空变化特征分析[J].农业环境科学学报,2012,31(8):1586-1595.
- [23]汪星,宫兆宁,井然,等.基于连续统去除法的水生植物提取及其时空变化分析——以官厅水库库区为例[J].植物生态学报,2018,42(6):640-652.
- [24]彭少麟,郭志华,王伯荪.利用GIS和RS估算广东植被光利用率[J].生态学报,2000,20(6):903-909.
- [25]朱文泉,潘耀忠,何浩,等.中国典型植被最大光利用率模拟[J].科学通报,2006,57(6):700-706.
- [26]徐力刚,赖锡军,万荣荣,等.湿地水文过程与植被响应研究进展与案例分析[J].地理科学展,2019,38(8):1171-1181.
- [27]CHEN Lifan, JIN Zhenyu, Michishita R, *et al.* Dynamic monitoring of wetland cover changes using time-series remote sensing imagery[J]. Ecological Informatics, 2014, 24: 17-26.
- [28]李洪,宫兆宁,赵文吉,等.基于Logistic回归模型的北京市水库湿地演变驱动力分析[J].地理学报,2012,67(3):357-367.

Estimation on Net Primary Productivity of Vegetation in Small Watershed of Guanting Reservoir

GONG Zhaoning¹, XIONG Kai², SUN Weidong³, LI Huimin^{1,4}

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, P.R.China; Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, P.R.China; Ecology and Environment Bureau of Shunyi District of Beijing City, Beijing 101300, P.R.China; 4. Research Institute of Piesat Information Technology Co., Ltd., Beijing 100195, P.R.China)

Abstract: Plants are the material basis of small watersheds, and the stability of vegetation net primary productivity is related to the health and sustainable development of small watersheds. Taking the small watershed of Guanting Reservoir as the research area, adopting the improved CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) model, using data of Landsat TM/ETM+/OLI images from March to November in 2005, 2010, 2015 and adjacent years to estimate the net primary productivity of vegetation in the small watershed of the Guanting Reservoir, taking into account the phenological characteristics of plants, in the calculation process of the model, the feature of time series of normalized difference vegetation index (NDVI) was introduced to extract ground information, thereby improve the accuracy of the maximum light energy utilization range in the improved CASA model. The results of the study showed that the total net primary productivity of vegetation in the small watershed of the Guanting Reservoir in 2005, 2010 and 2015 were 6.33×10^8 g carbon, 6.73×10^8 g carbon and 7.37×10^8 g carbon, respectively.

Keywords: vegetation; net primary productivity; improved CASA model; time series of normalized difference vegetation index