

近50年气候变化对七星河湿地生态系统 自然植被第一性净生产力的影响

王芳¹,高永刚²,白鸣祺¹

(¹黑龙江省双鸭山市气象局,黑龙江双鸭山 155100;²黑龙江省气象科学研究所,哈尔滨 150030)

摘要:自然植被第一性净生产力(Net primary productivity, NPP)可能是对气候变化反应最为敏感的生态环境因素之一,研究气候变化对NPP的影响可为湿地资源的恢复与保护及可持续发展提供理论依据。本研究利用1961—2008年网格插值的七星河湿地逐日气温、降水量资料,采用Miami(R)模型计算植被NPP($NPP_{地上}$ 与 $NPP_{总}$),并分析气温、降水量、植被干燥指数等对湿地自然植被NPP的影响。结果表明,七星河湿地 $NPP_{总}$ 与 $NPP_{地上}$ 的平均值分别为110.36和29.05 DMt/(hm²·a),近50年来湿地 $NPP_{总}$ 与 $NPP_{地上}$ 总体上呈增长趋势,年平均上升幅度分别为0.1291和0.0340 DMt/(hm²·a)。湿地自然植被NPP与年平均气温、年生长季平均气温呈较显著正相关,与年降水量、生长季降水量呈极显著负相关,与生长季植被干燥指数呈极显著正相关;当湿地生长季平均气温每升高1℃、湿地年降水量每增加1mm、湿地植被生长季的干燥指数每增加1℃/mm, $NPP_{总}$ 和 $NPP_{地上}$ 分别增加了1.5220和0.4006 DMt/(hm²·a)。在水资源较充足的七星河湿地,气温适度升高、降水量略呈减少、气候相对较干燥(水热条件配合较好)的气候条件有利于形成季节性积水的沼泽化湿地,提高植被光合作用率,促进七星河湿地自然植被NPP的增加。近50年的七星河湿地年平均自然植被 $NPP_{总}$ 约为 2.2072×10^6 t;年平均固碳量为 0.8829×10^6 t。在未来IPCC2000年排放方案SRES-B2(较低排放)情景下,未来七星河湿地自然植被 $NPP_{总}$ 和固碳量呈下降趋势,与近50年平均值相比,2020、2050和2100年下降幅度分别为5.37%、9.91%和13.59%。

关键词:气候变化;七星河湿地;生态系统;自然植被;NPP

中图分类号:S718.55+6

文献标志码:A

论文编号:2010-1668

Impact of Climate Change on Natural Vegetation Net Primary Productivity in Qixing River Wetland Ecosystem from 1961–2008

Wang Fang¹, Gao Yonggang², Bai Mingqi¹

(¹Shuangyashan Meteorological Bureau of Heilongjiang Province, Shuangyashan Heilongjiang 155100;

²Heilongjiang Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030)

Abstract: Natural vegetation net primary productivity (NPP) may be one of the most sensitive ecological environment factors for climate change reaction, the study of climate change impact on NPP can provide theoretical basis for recovery, protection and sustainable development of the wetland. With daily meteorological data such as air temperature and rainfall received by grid interpolation method in Qixing river wetland from 1961 to 2008, based on Miami(R) model and mathematical analysis of climate change, the impacts of climate change on NPP of wetland natural vegetation were analyzed, the factors of climate change include air temperature, rainfall and the vegetation dry index, NPP include $NPP_{地上}$ and $NPP_{总}$. The results showed that the

基金项目:黑龙江省气象局“近50年气候变化对湿地生态系统气候生产力影响技术研究”项目(MS200911)。

第一作者简介:王芳,女,1968年出生,河南上蔡人,高级工程师,大学本科,主要从事农业气象研究。通信地址:155100 黑龙江省双鸭山市尖山区净水路64号,E-mail:ycwangfang@yahoo.com.cn。

通讯作者:高永刚,男,1967年出生,黑龙江伊春人,高级工程师,研究生,硕士,主要从事生态与农业气象研究。通信地址:150030 黑龙江省哈尔滨市香坊区电碳路71号 黑龙江省气象科学研究所,Tel:0451-55110759,E-mail:gaoyg200210@yahoo.com.cn。

收稿日期:2010-06-02,修回日期:2010-07-05。

average values of $NPP_{\text{总}}$ and $NPP_{\text{地上}}$ were respectively 110.36 and 29.05 $DMt/(hm^2 \cdot a)$ and the $NPP_{\text{总}}$ and $NPP_{\text{地上}}$ were increasing in Qixing river wetland from 1961 to 2008, the average increasing rates were respectively 0.1291 and 0.0340 $DMt/(hm^2 \cdot a)$. The NPP of wetland natural vegetation was better positive correlative with the average yearly air temperature and the one during growing season, the best negative correlative with the yearly rainfall and the one during growing season, and the best positive correlative with the vegetation dry index during growing season. The $NPP_{\text{总}}$ and $NPP_{\text{地上}}$ of the wetland increased respectively 1.5220 and 0.4006 $DMt/(hm^2 \cdot a)$ when the average air temperature during growing season increased 1 $^{\circ}C$, the yearly rainfall increased 1 mm, and the vegetation dry index during growing season increased 1 $^{\circ}C/mm$. Because water resource was relatively adequate in Qixing river wetland, the NPP of Qixing river wetland natural vegetation increased under good climate conditions which included air temperature increased moderately, rainfall decreased slightly, and climate was relative dry, which were beneficial to form the seasonal waterlogged swamping wetland which could increase efficiency of vegetation photosynthesis. The average yearly value of the $NPP_{\text{总}}$ was about 2.2072×10^6 t, the yearly carbon absorbed was 0.8829×10^6 t in Qixing river wetland from 1961 to 2008. Under the future condition of IPCC2000 discharge plan SRES-B2, which the carbon dioxide by the discharge is lower. The yearly $NPP_{\text{总}}$ and carbon absorbed will be decreasing in the future, the decreased extents will be respectively 5.37%, 9.91% and 13.59% in 2020, 2050 and 2100 compared with the average values from 1961 to 2008.

Key words: climate change; Qixing river wetland; ecosystem; natural vegetation; NPP

0 引言

20世纪80年代以来,全球气候变化特别是气候变暖已成为各国政府关注的一项重要问题,也是目前研究的热点课题。气候变化不仅对天气气候产生许多异常、极端、甚至灾难性的影响,也严重威胁着人类赖以生存的环境,造成生态失衡、环境恶化、资源匮乏,严重影响了国民经济可持续发展。黑龙江省气候变化较为显著,对当地的农林及湿地生态系统产生一定影响。自然植被第一性净生产力(Net primary productivity, NPP)是湿地生态环境研究及衡量该系统健康状况的重要指标之一,也是湿地碳循环研究的基础内容之一。气候是控制湿地消长最根本的动力因素,气候变化对湿地的物质循环、能量流动、湿地生产力、湿地动植物均会产生影响^[1],同时湿地的消长还会改变湿地生态系统,进而加快气候变化的速度^[2]。 NPP 对气候变化反应较为敏感,也影响着湿地生态系统对生态环境的调节作用。目前,气候变化对陆地生态系统中的森林、草原等自然植被 NPP 影响研究成果相对较多^[3-6],对湿地生态系统面积、分布、功能等的消长^[2,7-10]及湿地水资源^[11-14]影响的研究成果也有较多报道,但近几十年来,气候变化对湿地生态系统 NPP 影响的研究成果却很少。因此,本研究利用气象资料和湿地观测资料,进行气候变化对黑龙江省七星河湿地生态系统 NPP 影响的研究,为当地应对气候变化,为湿地生态环境的影响与评估、湿地资源恢复与保护及可持续发展提供参考依据。

1 试验地概况及数据来源

1.1 试验地概况

七星河湿地国家级自然保护区,位于黑龙江省宝清县北部,地处七星河中下游,湿地面积 2×10^4 hm^2 ,优势植物为芦苇、小叶章。七星河湿地自然保护区属于内陆湿地与水域生态系统类型保护区,原始湿地生态系统齐全,是中国东北三江平原原始湿地生态系统的缩影。

1.2 数据来源

由于三江平原七星河湿地自动气象观测站观测资料(温度、降水)年限较短(2006—2009年),气候变化对湿地 NPP 的影响分析需要较长的湿地气象观测资料。因此,采用网格插值法^[15-16],利用全省81站1961—2008年逐日气象资料(气温、降水)进行网格插值($50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$),选取七星河湿地所在网格的逐日气象资料代替七星河湿地近50年的气候资料。七星河湿地自然植被 NPP 观测资料为2009年 $NPP_{\text{地上}}$ 观测数据。

2 研究方法

2.1 NPP 模型计算方法

根据4种自然植被第一性净生产力(NPP)模型(综合模型、Miami(T)或Miami(R)模型、Chikugo模型、朱志辉模型)^[3,17-18]计算可知,2009年七星河湿地综合模型、Miami(T)模型、Chikugo模型、朱志辉模型 $NPP_{\text{总}}$ 的计算值分别为7.62、8.97、0.41、0.75 $DMt/(hm^2 \cdot a)$, Miami(R)模型计算值为96.37 $DMt/(hm^2 \cdot a)$,而

2009年七星河湿地实际 $NPP_{地上}$ 观测数据为 $20.80 \text{ DMt}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。杨永兴等^[19]研究指出,三江平原洪河湿地优势植物为小叶章的湿地地上生物量与总生物量的比值为 0.2632 ,此比值作为七星河湿地植被地上生物量($NPP_{地上}$)与总生物量($NPP_{总}$)的比值,可计算湿地 $NPP_{总}$ 为 $79.03 \text{ DMt}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。对比分析可知,综合模型、Miami(T)模型、Chikugo模型、朱志辉模型的 NPP 计算值均远低于 NPP 实际观测值,而Miami(R)模型的计算结果与实际观测值接近,理论生物量 NPP 的计算值大于实际观测值,比较符合实际情况,Miami(R)模型在七星河湿地中的适用性较好。因此,七星河湿地 NPP 模型采用Miami(R)模型,即:

$$NPP(R) = 30(1 - e^{-0.00065R}) \dots\dots\dots (1)$$

式中: $NPP(R)$ 为根据年降水量计算的自然植被净第一性生产力($\text{DMt}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); R 为年降水量(mm)。

2.2 气候资料分析方法

2.2.1 气温与降水量分析方法 以年份为自变量,各年气温或降水量为应变量,利用线性方程 $y(t) = a_0 + a_1t$ 定量描述气温或降水量随时间的变化趋势,其中 $a_1 = dy(t)/dt$ 为稳定倾向率,即气温或降水量的年平均变化趋势。倾向率 a_1 可采用最小二乘法进行求解^[6,20],在实际气温或降水量的趋势分析中,通常分析48年稳定倾向率的10年变化情况,即:10年。

2.2.2 植被干燥指数计算 采用陈明容干燥度修正公式^[21]

$$G = \frac{C \sum T_{5-9}}{R} \dots\dots\dots (2)$$

式中: G 为植被干燥指数,其值越大说明越干燥,反之越湿润; $\sum T_{5-9}$ 为植被生长季(5月—9月)日平均气温 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温; C 为海拔高度订正系数(只比较年季变化时,为计算方便,取 $C=1$); $C \sum T_{5-9}$ 表示蒸发力

($^\circ\text{C}$); R 表示同期降水量(mm)。

3 结果与分析

3.1 气候变化分析

气温统计分析表明,七星河湿地、周边地区的年平均最低气温升温最显著,年平均气温次之,年平均最高气温最不明显,与全省趋势一致。宝清县的年平均最高气温升高趋势较小($0.21^\circ\text{C}/10 \text{ a}$),年平均最低气温升高趋势最大($0.63^\circ\text{C}/10 \text{ a}$),表明七星河湿地对当地(宝清县)气候具有重要的调节作用,可减缓在气候变化背景下的当地气候的变化幅度。七星河湿地近50年的年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温变率分别为 0.28 、 0.12 、 $0.42^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,均较宝清县及周边区域变率要小,说明湿地本身对气候变化的适应与调节作用明显。降水量统计分析表明,双鸭山地区、宝清县、七星河湿地近50年的年降水量变率分别为 2.0 、 -17.8 、 $-7.7 \text{ mm}/10 \text{ a}$,表明双鸭山地区降水量有增加趋势;宝清县、七星河湿地年降水量呈减少趋势,其减小幅度低于宝清县。

植被干燥指数统计分析表明,近50年七星河湿地植被生长季干燥指数呈增加趋势,增加幅度为 $0.325 (^\circ\text{C}/\text{mm})/10 \text{ a}$,表明七星河湿地在水资源较充足的条件下,植被生长季水热配合条件提高。

3.2 湿地自然植被 NPP 的年际变化

基于七星河湿地1961—2008年逐日气象资料,采用Miami(R)模型计算湿地自然植被 $NPP_{总}$ 。根据三江平原洪河湿地优势植物为小叶章的湿地的地上生物量与总生物量的比值为 0.2632 的研究结果^[19],可计算湿地 $NPP_{地上}$ 。七星河湿地1961—2008年湿地自然植被 $NPP_{地上}$ 与 $NPP_{总}$ 的年际变化如图1。

从总体上看,20世纪60年代中期到80年代初期,湿地 $NPP_{地上}$ 与 $NPP_{总}$ 处于增多阶段;80年代中期到90年代后期,湿地 $NPP_{地上}$ 与 $NPP_{总}$ 处于减少阶段;1999年

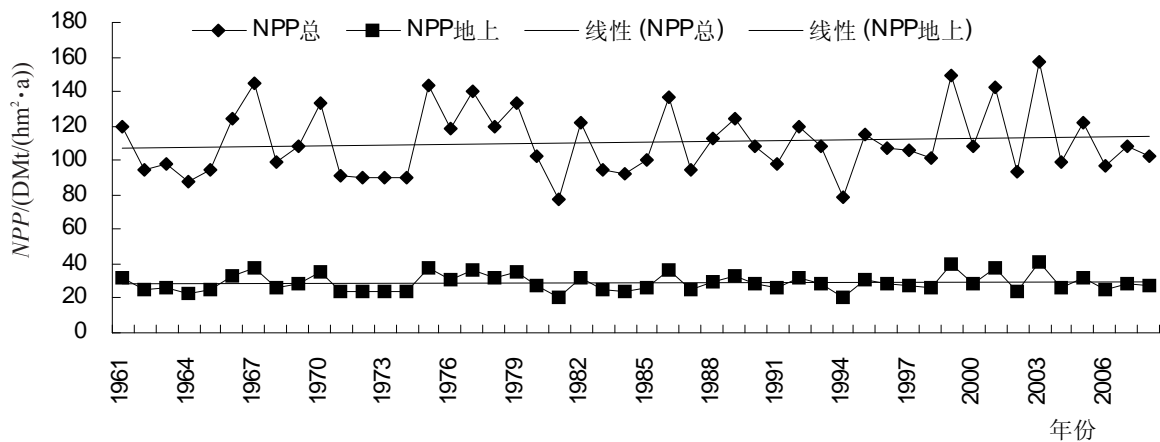


图1 1961—2008年七星河湿地自然植被 $NPP_{地上}$ 与 $NPP_{总}$ 年际变化

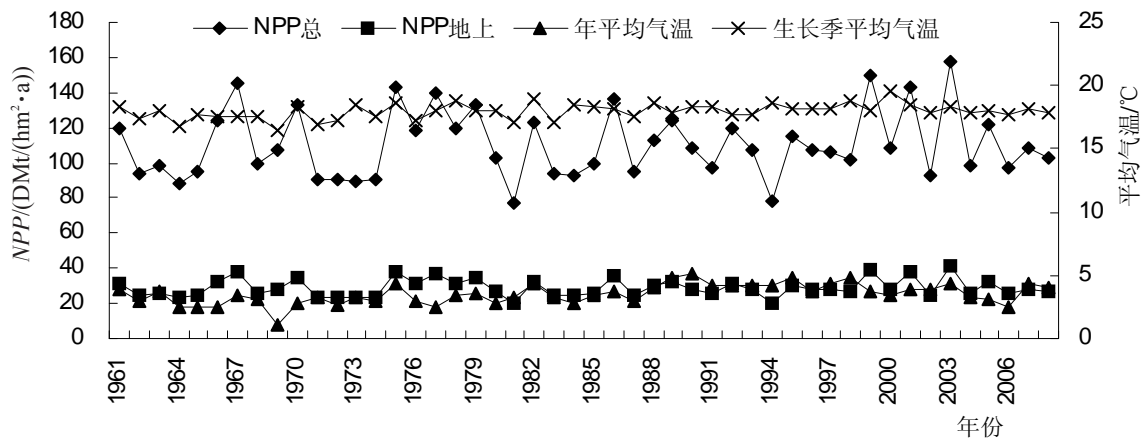


图2 近50年七星河湿地气温与湿地自然植被 NPP 年际变化

后,湿地 $NPP_{地上}$ 与 $NPP_{总}$ 呈现缓慢回升的趋势。统计分析表明,七星河湿地 1961—2008 年近 50 年湿地 $NPP_{地上}$ 与 $NPP_{总}$ 的年平均值分别为 29.05 和 110.36 $DMt/(hm^2 \cdot a)$; 近 50 年湿地 $NPP_{地上}$ 与 $NPP_{总}$ 总体上呈上升趋势,年平均上升幅度分别为 0.0340 和 0.1291 $DMt/(hm^2 \cdot a)$ 。

3.3 气候变化对湿地自然植被 NPP 的影响

3.3.1 气温变化对湿地自然植被 NPP 的影响 近 50 年七星河湿地气温(年平均气温、年生长季平均气温(5—9月))与湿地 NPP 变化关系如图 2 所示。统计分析表明,七星河湿地 NPP 与年平均气温、年生长季平均气温呈正相关,相关系数分别为 0.2210 与 0.2777(通过 $P < 0.05$ 显著性检验),说明湿地区域气温的适度升高对湿地植被 NPP 增加有一定的促进作用,特别是生长季平均气温的适度升高在一定程度上可提高植被光合作用强度,增加了植被干物质的积累与转化,促进了湿地 NPP 的增加。

3.3.2 降水量变化对湿地自然植被 NPP 的影响 近 50 年七星河湿地降水量(年降水量、生长季(5—9月)降水量)与湿地 NPP 变化关系如图 3 所示。统计分析表

明,七星河湿地自然植被 NPP 与年降水量、生长季降水量呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.9710 与 -0.8827(通过 $P < 0.001$ 显著性检验),这主要是由于七星河湿地水资源较充足,较少的间歇性的降水可形成季节性积水的沼泽化湿地,有利于提高植被光合作用率,促进七星河湿地植被 NPP 的增加。这与现有的研究^[22]结论相似。

3.3.3 湿地植被干燥度变化对湿地自然植被 NPP 的影响 近 50 年七星河湿地植被生长季(5—9月)植被干燥指数与湿地 NPP 变化关系如图 4 所示。统计分析表明,七星河湿地自然植被 NPP 与生长季植被干燥指数呈极显著正相关,相关系数为 0.9318(通过 $P < 0.001$ 显著性检验)。干燥指数为植被蒸发力与同期降水量的比值,其值越大,说明越干燥,反之越湿润;干燥指数同时也反映了植被生长季水热条件的配合程度。三江平原七星河湿地水资源较充足,在湿地气候相对较干燥的年份(干燥指数相对较高),湿地水热条件配合较好,湿地植被蒸发散量增大,植被光合作用增强,干物质积累与转化量增加;同时由于降水量相对减少,易形成季

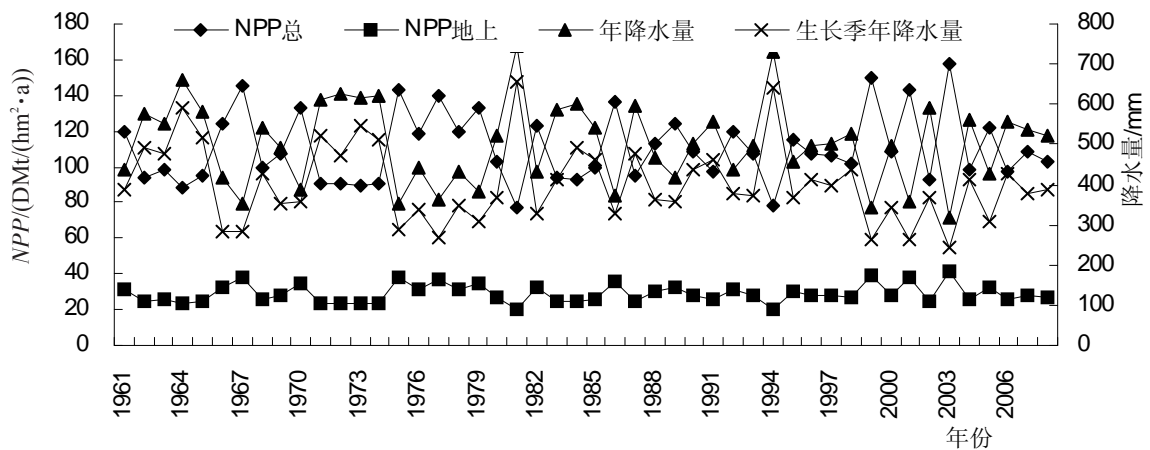


图3 近50年七星河湿地降水量与湿地自然植被 NPP 年际变化

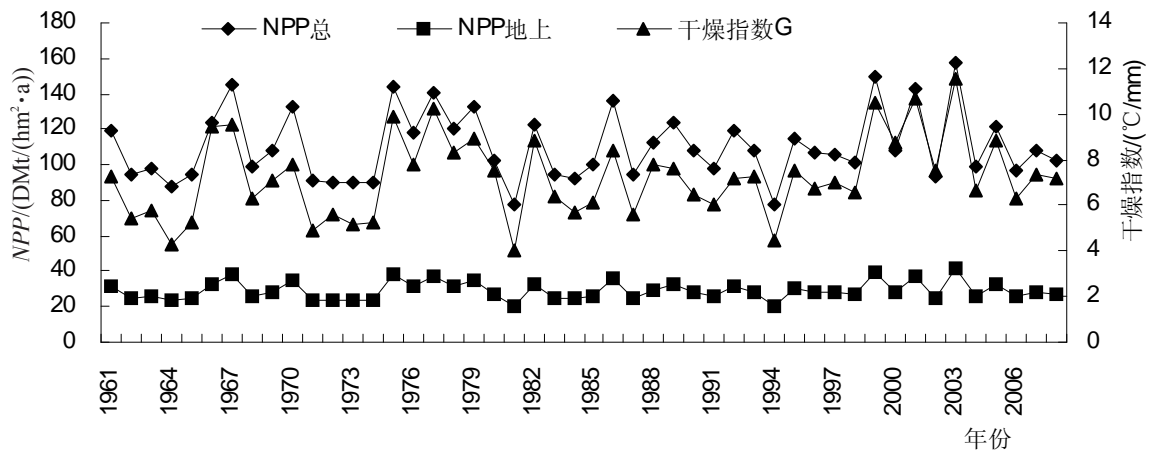


图4 近50年七星河湿地植被生长季干燥指数与湿地NPP年际变化

节性积水的沼泽化湿地,可促进湿地自然植被NPP的增加。

3.3.4 气候变化对湿地自然植被NPP影响的定量分析
以湿地植被生长季(5—9月)的平均气温为湿地植被生长的温度影响因子,湿地年降水量为湿地植被生长水分影响因子,干燥指数为湿地植被生长季的水热条件配合程度影响因子,以七星河湿地NPP_总为因变量,应用多元线性回归方程进行拟合,复相关系数R为0.9769(通过 $P < 0.001$ 极显著性检验)。NPP_{地上}可用方程(3)乘以系数0.2632^[19]求得。

$$NPP_{总} = -1.3899X_1 - 0.1391X_2 + 3.0501X_3 + 183.2708 \dots \dots \dots (3)$$

式中: NPP_总表示湿地自然植被第一性净生产力(DMt/(hm²·a)); X₁为湿地植被生长季的平均气温(°C); X₂为湿地年降水量(mm); X₃为湿地植被生长季的干燥指数(°C/mm)。当湿地生长季平均气温每升高1°C、湿地年降水量每增加1 mm、湿地植被生长季的干燥指数每增加1°C/mm, NPP_总和NPP_{地上}分别增加了1.5220和0.4006 DMt/(hm²·a)。

3.3.5 气候变化对湿地自然植被固碳量的影响
在自然环境条件下,陆地植被通过光合作用和呼吸作用与大气中CO₂的交换是构成大气CO₂浓度季节性变化的主要自然因素之一。根据植被光合作用方程与干物质总量可初步估算湿地的年固碳量。初步估算表明,近50年来三江平原七星河湿地年平均NPP_总约为2.2072×10⁶ t;年平均固定CO₂量为3.2372×10⁶ t;年平均固定碳量为0.8829×10⁶ t。

在未来IPCC2000年排放方案SRES-B2(较低排放)情景下,根据2020、2050和2100年气候预估资料^[23],根据湿地自然植被NPP_总与气候水热要素的关系式(即(3)式),初步计算表明,2020、2050和2100年三江

平原七星河湿地自然植被NPP_总分别为2.0887×10⁶、1.9884×10⁶和1.9073×10⁶ t;固定CO₂量分别为3.0634×10⁶、2.9163×10⁶和2.7974×10⁶ t;固定碳量分别为0.8355×10⁶、0.7954×10⁶和0.7629×10⁶ t。可见,在未来气候变化条件下,三江平原七星河湿地自然植被NPP_总、固定CO₂量、固碳量均呈下降趋势,与近50年平均值相比,2020、2050和2100年下降幅度分别为5.37%、9.91%和13.59%。

4 结论

(1)近50年来七星河湿地年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温变率低于周边区域,湿地对气温调节作用明显;年降水量略呈减少趋势。

(2)近50年来七星河湿地NPP_总与NPP_{地上}的平均值分别为110.36和29.05 DMt/(hm²·a),湿地NPP_总与NPP_{地上}总体上呈增加趋势,年平均增幅分别为0.1291和0.0340 DMt/(hm²·a)。

(3)气温适度升高特别是生长季气温适度升高,在一定程度上可提高植被光合作用强度,增加了植被干物质的积累与转化,促进了湿地自然植被NPP的增加;由于七星河湿地水资源较充足,降水量略呈减少且间歇性的降水可形成季节性积水的沼泽化湿地,有利于七星河湿地自然植被NPP_总的增加;湿地气候相对较干燥的年份(植被干燥指数相对较高),湿地水热条件配合较好,湿地植被蒸发散量增大,植被光合作用增强,促进湿地植被NPP_总的增加。

(4)从气温、降水量、植被干燥指数方面综合定量分析,七星河湿地植被生长季平均气温每升高1°C、湿地年降水量每增加1 mm、湿地植被生长季的干燥指数每增加1°C/mm, NPP_总与NPP_{地上}增加量分别为1.5220和0.4006 DMt/hm²·a。

(5)近50年来七星河湿地年平均NPP_总约为

2.2072×10⁶ t;年平均固定碳量为0.8829×10⁶ t。在未来IPCC2000年排放方案SRES-B2(较低排放)情景下,2020、2050和2100年三江平原七星河湿地植被NPP_总分别为2.0887×10⁶、1.9884×10⁶和1.9073×10⁶ t;固定碳量分别为0.8355×10⁶、0.7954×10⁶和0.7629×10⁶ t;未来七星河湿地自然植被NPP_总和固碳量呈下降趋势,与近50年平均值相比,2020、2050和2100年下降幅度分别为5.37%、9.91%和13.59%。

5 讨论

湿地植被NPP模型采用的是Miami(R)经验统计模型,尽管在七星河湿地NPP计算中优于其他模型效果,但在湿地植被光合与呼吸作用、干物质积累、转化及生物量形成中存在理论基础不足的缺点。基于植物生理生化过程复杂的CENTURY模型等可弥补经验统计模型的不足。因此,更深入的研究应从基于植物生理生化过程的机理模型着手,探讨气候变化对湿地植被NPP的影响。

此外,由于湿地气候观测资料不足,本研究采用湿地所在网格点的近50年逐日插值资料代替湿地资料,这在湿地气候分析的精度上可能会有一些影响,但在气候趋势分析上应该是一致的,因此,湿地气候分析方面是可靠的。随着七星河湿地气候与植被观测资料的积累,湿地自然植被NPP及气候分析的精度将得到进一步改观。

参考文献

- [1] Cao Mingkui, Li Kerang. Perspective on terrestrial ecosystem climate interaction[J]. *Advance in Earth Science*, 2000,15(4): 446-451.
- [2] 张树清,张柏,汪秀华.三江平原湿地消长与区域气候变化关系研究[J].*地球科学进展*,2001,16(6):836-841.
- [3] 周广胜,张新时.全球变化的中国自然植被的净第一性净生产力研究[J].*植物生态学报*,1995,20(1):9-27.
- [4] 周广胜,张新时.中国植被对全球变化反应的研究[J].*植物生态学报*,1997,39(9):897-888.
- [5] 刘春蔡.中国的气候变化与气候影响研究[M].北京:气象出版社,1997:48-482.
- [6] 高永刚,温秀卿,顾红,等.黑龙江省气候变化趋势对自然植被第一性净生产力的影响[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2007,35(6):171-178.
- [7] 傅国斌,李克让.全球变暖与湿地生态系统的研究进展[J].*地理研究*,2001,20(1):120-128.
- [8] 张树清,庄毓敏,汪爱华,等.三江平原沼泽湿地时空动态特征[J].*地理学报*,2002,57(增刊):49-100.
- [9] 汪爱华,张树清,何艳芳. RS和GIS支持下的三江平原沼泽湿地动态变化研究[J].*地理科学*,2002,22(5):636-640.
- [10] 王根绪,李元寿,王一博,等.近40年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化[J].*地理学报*,2007,62(5):482-491.
- [11] 刘春兰,谢高地,肖玉.气候变化对白洋淀湿地的影响[J].*长江流域资源与环境*,2007,16(2):246-250.
- [12] 赵慧颖,乌力吉.气候变化对呼伦湖湿地及周边生态环境演变的影响[J].*生态学报*,2008,28(3):1-8.
- [13] Nash L L, Gleick P H. Sensitivity of stream flow in the Colorado Basin to climate change[J].*Journal of Hydrology*,1990,125(1): 221-241.
- [14] 周林飞,许士国,李青山,等.扎龙湿地生态环境需水量安全闭值的研究[J].*水利学报*, 2007,38(7):845-851.
- [15] 徐士良.常用算法程序集[M].北京:清华大学出版社,1994:50-52.
- [16] 高永刚,张福娟,王育光.黑龙江省主要林型气候生产力的特征分析[J].*中国农业气象*,2006,27(4):318-322.
- [17] 林惠龙,常生华,李飞.草地净初级生产力模型研究进展[J].*草业科学*,2007,24(12):26-29.
- [18] 王胜兰.基于5种气候生产力模型的乌鲁木齐地区NPP计算分析[J].*沙漠与绿洲气象*,2008,2(4):40-44.
- [19] 杨永兴,王世岩,何太蓉,等.三江平原典型湿地生态系统生物量及其季节动态研究[J].*中国草地*,2002, 24(1):1-7.
- [20] 爱华计算机工作室.最小二乘法原理[EB/OL].<http://www.caihua.com/ahrjyl.htm>.
- [21] 姚玉碧,王润元,尹东,等.气候变化对黄河首曲地区草地生态退化的影响[J].*资源科学*,2007,29(4):127-133.
- [22] 张文菊,童成立,刘守龙,等.三江平原湿地小叶章生产力模拟模型[J].*植物生态学报*,2006,30(5):844-851.
- [23] 《气候变化国家评估报告》编写委员会.《气候变化国家评估报告》[R].2005:148-150.