

扎龙湿地 NPP 时空格局及其对气候因子变化的响应

于成龙^{1, 2, 3}, 刘丹^{1, 2, 3*}

1. 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省气象院士工作站, 黑龙江 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030

摘要: 植被净初级生产力 (NPP) 是表征陆地生态系统对气候变化响应的重要指标, 扎龙湿地是全球气候变化敏感区域湿地生态系统的典型代表, 基于遥感资料和气候资料, 借助 GIS、RS 技术和地理探测器方法, 估算了 2000—2017 年扎龙湿地植被 NPP 时空分布特征, 探索了植被 NPP 空间异质性及气候因素对其动态变化的影响, 为研究气候变化背景下湿地碳循环的响应过程与驱动机制提供参考。结果表明, 2000—2017 年, 扎龙湿地植被 NPP 年平均值为 $478.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (以 C 计, 下同), 其中有水草甸为 $483.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 无水草甸为 $485.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 农作物为 $448.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 有水草甸和农作物的 NPP 年平均值均呈显著增加趋势。扎龙湿地核心区 NPP 年平均值最高, 为 $513.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 试验区 NPP 平均值最低, 为 $422.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。水分因子对植被 NPP 的总体影响力大于温度因子, 对水分的依赖程度由大到小排序依次为无水草甸、农作物、有水草甸, 对温度的依赖程度由大到小排序依次为无水草甸、有水草甸、农作物。气候因子两两交互作用对自然植被 NPP 动态变化的总体影响显著大于农作物, 其中 4—10 月 EI 和年平均气温的协同作用对无水草甸 NPP 动态变化的贡献率达 37.85%, 4—10 月日较差和年平均气温的协同作用对有水草甸 NPP 动态变化的贡献率达 31.14%, 年平均气温和无霜期的协同作用对农作物 NPP 动态变化的贡献率达 29.00%。

关键词: NPP; 影响机制; 地理探测器; 扎龙湿地

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.04.013

中图分类号: Q948; X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2019) 04-0741-11

引用格式: 于成龙, 刘丹, 2019. 扎龙湿地 NPP 时空格局及其对气候因子变化的响应[J]. 生态环境学报, 28(4): 741-751.

YU Chenglong, LIU Dan, 2019. Spatio-temporal evolution and climate effect of NPP in Zhalong Wetland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 28(4): 741-751.

湿地是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 也是对气候变化非常敏感的生态系统, 以气候变暖、极端天气事件出现频率增加为标志的全球气候变化, 正在对湿地固有的自然过程产生影响 (Duffy, 2006; 孟焕等, 2016)。植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 是植被在生态系统中物质或能量转换和传递的基础, 直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力, 也是分析气候变化对陆地生态系统影响的重要指标 (Ito, 2011; 王红岩, 2013)。大量研究表明, 气候因素对植被 NPP 的影响因地域和植被类型不同而出现差异, 气候变暖可以促进植物的光合作用, 但气温升高会刺激植物的自养呼吸, 而且水分和温度条件也会对光合作用和呼吸作用产生协同效应 (Padfield et al., 2017; Michaletz, 2018; Kurse et al., 2018; Li et al., 2018)。另外, 植被 NPP 对温度和降水的依赖性高度取决于

生态系统类型和气候区, 如在北半球中高纬度湿润与半湿润地区, 植物生长主要受温度条件的限制 (Luo et al., 2004; Forzieri et al., 2014), 而在干旱和半干旱地区, 降水成为生态系统生产力的主要控制因素 (Peng et al., 2008; Murray-Tortarolo et al., 2016)。因此, 量化 NPP 的年际变化和气候驱动效应将有助于理解陆地碳动力学和应对气候变化的潜在机制。

扎龙湿地位于黑龙江省西部乌裕尔河下游地区, 是亚洲第一、世界第四大湿地和世界最大的芦苇 (*Phragmites communis*) 湿地, 也是处于全球气候变化敏感区域的湿地生态系统的典型代表 (佟守正等, 2008)。已有学者对扎龙湿地植被生物量及其驱动效应开展研究, 如庞丙亮等 (2014) 基于 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 估算模型, 分别对扎龙湿地的植物固碳和土壤碳储存价值

基金项目: 黑龙江省科学基金面上项目 (D2018006); 2018 年中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室开放研究基金项目 (stqx2018zd03); 2017 年中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室开放研究基金项目 (stqx2017zd01)

作者简介: 于成龙 (1973 年生), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事生态气象方面的研究。E-mail: nefuycl@163.com

*通信作者, E-mail: nefuliudan@163.com

收稿日期: 2019-01-07

进行评价,并探讨了扎龙湿地固碳价值的空间分布特征;马楠楠(2016)研究了扎龙湿地芦苇盖度的变化过程,并分析了其与降水、气温、相对湿度等气象因子的相关性;Feng et al.(2013)研究了气候变化对扎龙湿地水源的影响;王永洁等(2009)分析了季节性冻融扎龙湿地演化的影响;代存芳等(2017)分析了气候变化对芦苇种群构建的影响。但目前有关 NPP 气候驱动效应的研究在方法上只注重传统的相关分析或回归分析,气候因子之间协同效应的定量研究尚显薄弱,而科学认识和定量评价扎龙湿地植被 NPP 变化的气候单因子或多因子的耦合驱动作用,对评价湿地变化的气候驱动效应,实现湿地资源的管理与保护具有重要意义。

本研究针对上述研究存在的关键科学问题,基于遥感资料和气象资料,借助 GIS、RS 技术和地理探测器,开展扎龙湿地植被 NPP 动态变化的时空异质性及多气候因子及其交互作用对其影响的评价研究,以期为研究气候变化对湿地碳循环的影响过程与驱动机制提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

扎龙湿地位于黑龙江省西部乌裕尔河下游地区,地理坐标为 $123^{\circ}47' - 124^{\circ}37'E$, $46^{\circ}52' - 47^{\circ}32'N$,总面积约 2250 km^2 ,被列入中国首批“世界重要湿地名录”。扎龙自然保护区内划分有核心区(739 km^2)、缓冲区(699 km^2)和试验区(812 km^2) (黑龙江省扎龙国家级自然保护区管理局 <http://www.chinazhalong.gov.cn/>),乌裕尔河为形成和维持扎龙自然保护区湿地生态系统的主导水源(郭跃东,2004)。湿地内土壤主要为黑钙土、草甸土、沼泽土。

湿地内自然植被覆盖度平均为 65.15%,农作物覆盖度平均为 14.24%(于成龙等,2018),自然植被中高等植物 468 种,隶属于 67 科,草本植物占绝大多数,分为 4 个类型(郑宝江等,2008):蒙古植物区系,包括黄芩(*Scutellaria scordifolia*)、北丝石竹(*Gypsophila davurica*)和西伯利亚滨藜(*Atriplex sibirica*)等;大兴安岭植物区系和达蒙区系,包括问荆(*Equisetum arvense*)、毛柄水毛茛(*Batrachium trichophyllus*)、绿珠藜(*Chenopodium acuminatum*)等;华北区系和华蒙区系,包括拟漆姑(*Spergularia marina*)、地梢瓜(*Cynanchum thesioides*)、地肤(*Kochia scoparia*)等;长白植物区系和长蒙植物区系,包括大果虫实(*Corispermum maorocarpum*)、柳叶鬼针(*Bidens cernua*)和酸模(*Rumex acetosa*)等,本区内无特有种。扎龙湿地属温带大陆性季风气候,根据黑龙江省气象局提供

的 1980—2010 年扎龙湿地及周边约 100 km 缓冲区内的气象观测站逐日平均数据统计,年平均气温 $4.34\text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月是 1 月,极端日最低气温为 $-23.64\text{ }^{\circ}\text{C}$,最热月是 7 月,极端日最高气温为 $28.26\text{ }^{\circ}\text{C}$;年平均降水量 429.00 mm ;平均日照时数 $7.41\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

1.2 数据与方法

1.2.1 土地利用/覆盖数据

本文以 Landsat 数据为主进行土地利用/覆盖分类,其空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$,将研究区分为自然植被、农田、水体、建筑用地和未利用地,共 5 类。数据来源为美国地质调查局官网(<http://glovis.usgs.gov/>),轨道号为 120,行号为 27,其中 2000—2011 年所用数据为 Landsat5/TM 数据,2013—2017 年为 Landsat8/OLI_TIRS 数据。

环境减灾 HJ-1A/1B 卫星资料用于补充 Landsat 数据缺失的年份(2012 年)(<http://www.cresda.com/n16/index.html>),空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。

1.2.2 MOD15A2H 数据产品

MOD15A2H 数据是 MODIS 叶面积指数和光合有效辐射吸收比例(Leaf Area Index and Fraction of Photosynthetically Active Radiation)累积的 8 天合成值产品,原始空间分辨率为 500 m ,与 MOD15A2 相比,MOD15A2H 用 L2G-lite 表观反射率代替了 MOD15A2 产品算法中的 MODIS 表观反射率产品(MODAGAGG),在计算时引用了改进后的多年土地覆盖分类产品,产品的空间分辨率也由 1 km 提高到 500 m (Myneni et al., 2015)。本文利用光合有效辐射吸收比例(FPAR)数据计算 NPP。

1.2.3 气象数据

气象数据来源于黑龙江省 2001—2017 年的乌裕尔河流域 11 个气象台站逐日资料,包括日平均气温、日降水量、日照时数、 10 m 日平均风速、日平均相对湿度、日平均大气压等基本气象要素,气象观测站的地理位置如图 1。

气候变化研究必须建立在可靠的资料基础上,而实测的资料由于受台站迁移等因素的影响,大都存在序列的不均一性,这样会掩盖真实的气候变化(任福民等,1998)。因此,在进行气候变化分析之前,先对资料进行均一性检查和质量控制(魏凤英,1999),再采用 Newton 法对缺失数据进行插补。

1.2.4 地面样点调查数据

地面样点调查数据用于对土地利用分类结果和 NPP 估算结果进行验证,于 2017 年 8 月末和 9 月初分别通过建立样方($1\text{ m}\times 2\text{ m}$)进行实地调查和取样,共设 55 个采样点(控制区域为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$),多数采样点在控制区域范围内选择 2 个样方,

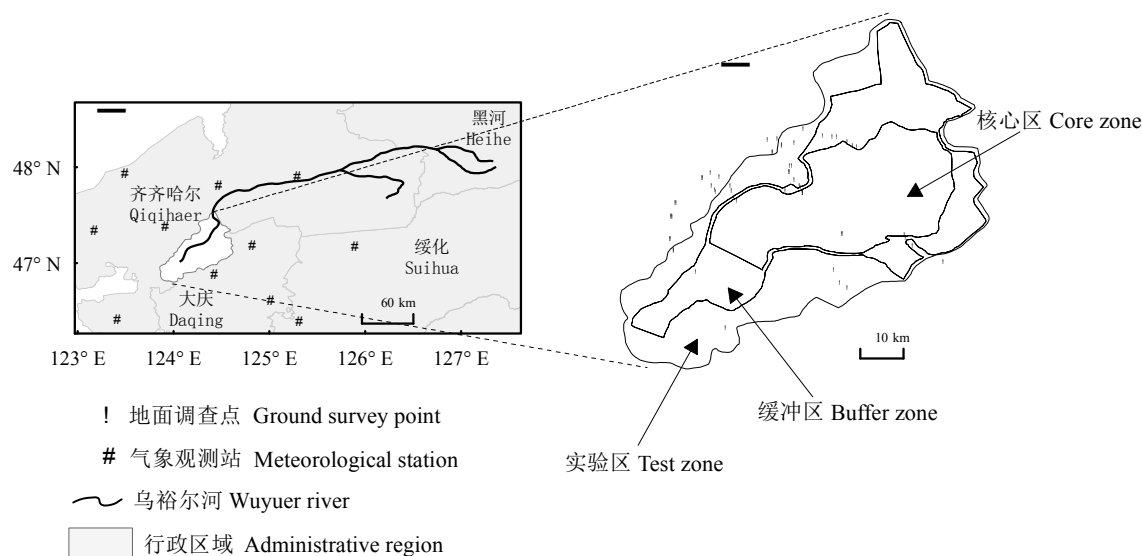


图 1 研究区位置及地面调查点分布图

Fig. 1 Location map of the study area and sampled sites

观测项目包括植被种类、地上生物量、样方的经纬度和海拔高度、植被盖度、植被冠层平均高度, 收割每个样方植被的地上部分, 烘干后测量其干重并计算平均值。样点空间分布如图 1, 采样植被主要为芦苇和羊草 (*Leymus chinensis*), 其中 21 个样点为水生植被, 34 个样点为旱生植被。

1.3 研究方法

1.3.1 地面样方数据估算

参考贾庆宇等 (2006) 对东北湿地芦苇生物量研究的结论, 即 9 月份湿地芦苇的根冠比 (植物地下部分与地上部分生物量干重或鲜重的比值) 为 1.487, 估算本研究区实地调查样方中芦苇的总生物量, 再根据目前通用的生物量干重与 NPP 的转换系数 (0.45) (方精云等, 1996), 估算每个样方中芦苇的 NPP, 范围为 223.82—637.92 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计, 下同), 平均值为 423.15 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 标准差为 87.74 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

1.3.2 气象指标构建及数据处理

Woodward (1987) 指出, 影响植物生长和地理分布的主要因子有 3 类: 植物能够忍受的最低温度; 完成生活史所需的生长季长度和热量供应; 用于植物冠层形成和维持的水分供应。因本文只涉及到现有种的生产力研究, 所以只选取后两类气候因子作为植被 NPP 变化驱动效应的研究。考虑到 4—10 月为扎龙湿地植物生长季, 因此选取年平均气温、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、最暖月平均气温和无霜期共同反映植物对热量的需求; 选取年降水量、4—10 月降水量、4—10 月平均湿润指数 (EI)、积雪深度等变量代表植物对水分的需求, EI 为年降水量与年潜在蒸散量

的比值, 其中年潜在蒸散率采用 Holdridge 方法计算 (白晓兰等, 2017); 选取 4—10 月气温日较差反映气温变幅。

以上指标数据借助 ARCGIS 10.2 平台统一图层边界、统一坐标系 (WGS-1984-UTM), 并应用 IDW 方法将其插值为 500 m 空间分辨率的栅格数据。

1.3.3 土地利用/覆盖分类

土地利用/覆盖分类结果为遥感估算 NPP 提供基础数据, 将研究区土地利用类型划分为有水草甸、无水草甸、农田、水体、建筑用地和未利用地 6 种类型。在分析每种遥感影像数据波段特征的基础上, 采用 Chavez et al. (1982) 提出的最佳指数因子法 (Optimum Index Factor, OIF), 判断最佳波段组合, 其中 Landsat 数据的最佳波段组合为 Green 波段、NIR 波段和 SIR 波段, HJ-1A/B 的 CCD 相机数据的最佳波段组合为 Green 波段、Red 波段和 NIR 波段。

因蓝光波段对水体较为敏感, 近红外波段和中红外波段对建筑用地和裸地较为敏感, 本文引入 NDISI (Normalized Difference Impervious Surface Index) 增强影像中的建筑用地和裸地信息, NDWI (Normalized Difference Water Index) 增强影像中水的信息, 并把这两个指数组合形成 WLI (Water Land Index, 公式为 $\text{WLI} = \text{NDISI}^{\text{NDWI}}$), 从而进一步增强水、建筑用地和裸地的差异。NDISI 和 NDWI 计算方法参见徐涵秋 (2011) 和任岩等 (2016) 文献。再把筛选出的波段、WLI 和 NDVI 叠加, 结合 CART 决策树模型和面向对象分类法进行分类, 获得土地利用/覆盖信息提取结果。

精度验证方法是以 0.02°为距离间隔在研究区内每幅影像提取 662 个精度验证点, 先通过目视解译的方式确定每个点的土地利用/覆盖类型, 对每个分类结果进行精度验证。结果显示总体分类精度在 90%—92%之间, Kappa 系数在 0.89—0.91 之间。

1.3.4 NPP 估算

本文选取气候生产力模型和遥感模型计算扎龙湿地年净初级生产力 (NPP), 其中气候生产力模型包括: 综合模型 (周广胜等, 1995)、Miami 模型 (Leith et al., 1975)、Thornthwaite Memorial 模型 (Leith et al., 1972) 和北京模型 (朱志辉 1993); 遥感模型包括 CASA 模型 (Potter et al., 1993) 和 TEC 模型 (Yan et al., 2015)。将同一栅格下的 NPP 估算结果与地面实测值进行对比分析, 选取最适合扎龙湿地 NPP 的计算方法。

分析图 2 可知, 实测 NPP 的平均值为 423.15 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 与之最接近的是 CASA 模型的估算值 (423.68 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 其次是北京模型 (461.47 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), TEC 模型的估算结果略低于实测 NPP (326.56 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 综合模型 (194.82 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 和 Thornthwaite Memorial 模型 (181.49 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 估算结果远远低于实测值; NPP 实测值为 85.47 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 均高于各个模型估算结果 (5.06—64.24

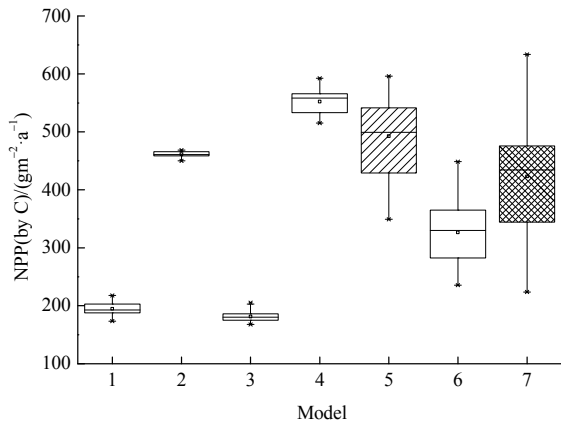


图 2 不同方法获取的 NPP 箱式分布图

Fig. 2 Box chart of NPP by different methods

纵坐标中 1—7 分别代表综合模型、北京模型、Thornthwaite Memorial 模型、Miami 模型、CASA 模型、TEC 模型和实际测量。 $n=55$

1-Synthetic model, 2-Beijing model, 3-Thornthwaite Memorial model, 4-Miami model, 5-CASA model, 6-TEC model, 7-measured value

表 1 实测值与不同模型估算结果对比

Table 1 Comparison between measured values and calculation results by using different models

Item	Comprehensive model	Beijing model	Thornthwaite Memorial model	Miami model	CASA model	TEC model
R	-0.174	-0.176	0.052	0.146	0.234	-0.119
Sig.	0.195	0.189	0.701	0.279	0.049	0.377
t -test Independent-samples T test	Sig.<0.001	Sig.<0.001	Sig.<0.001	Sig.<0.001	Sig.=0.969	Sig.=0.002

$n=55$

$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

分析表 1 可知, 与实测值相关系数最高的是 CASA 模型估算结果 ($R=0.234$), 并通过了置信度为 95%的显著性检验 ($\text{sig.}=0.049$), 其他模型估算结果与实测值均不存在显著相关; 另外, 独立样本 t 检验结果显示, 仅 CASA 模型估算结果与实测值无显著差异, 因此选取 CASA 模型估算扎龙湿地的 NPP。

1.3.5 地理探测器原理与应用

地理探测器方法通过研究目标因子的分异特征, 同时探测因子及其交互作用的影响实现度量单一因子或两因子交互作用的驱动效应。该模型的核心是解释影响因子对目标因子空间分异的解释程度, 用 q 值度量, 具体表达式为 (Wang et al., 2010):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中, $h=1, 2, \dots, L$; L 为影响因子的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区目标值的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越接近 1, 表示影响因子的主导驱动作用越强。同时检验 q 值的显著性。

为使 NPP 和气候因子在空间上相对应, 本文借助 ARCGIS 10.2 平台的渔网点工具生成等间距 (0.02°) 的采样点 192 个, 利用采样点提取 2000—2017 年研究区的 NPP 和气候因子数值, 每个变量提取 9 273 个点 (不同年份土地利用类型可能会发生变化, 有水草甸大概为 4 771 个, 无水草甸为 2 827 个, 农作物为 1 639 个) 作为地理探测器的运行数据。地理探测器的输入变量要求是类别数据, 需要对连续型变量进行离散化处理。本文根据各气候因子的值域将其等间距分为 10 个等级 (表 2)。

1.3.6 Holdridge 潜在蒸散率

$$\text{PER} = 58.93 \times \sum_{i=1}^{365} t_i / P \quad (2)$$

式中, PER 为潜在蒸散率; P 为年降水量, t_i 为日平均气温 ($0^\circ\text{C} \leq t_i \leq 30^\circ\text{C}$, i 为日, $i=1, 2, \dots, 365$), 日平均气温 t_i 低于 0°C 时, 计作 0°C , 高于 30°C 计作 30°C 。

表 2 气候因子值域及等级划分的间距
Table 2 Space between meteorological factor range and grade division

Item	Mean temperature of the coldest month	Annual extreme minimum temperature	Annual average temperature	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Cumulative temperature	Warmest average monthly temperature	Frost-free season	Annual precipitation	Precipitation from April to October	EI form April to October	Snow depth	Diurnal temperature range from April to October
Minimum value	-23.81	-37.20	3.06	2996.73	22.01	152.91	264.79	246.64	0.47	0.02	9.50
Maximum value	-12.86	-22.91	6.05	3403.47	25.51	184.63	761.47	740.24	2.21	20.46	12.32
Space	1.10	1.50	0.30	40.70	0.37	3.20	49.70	49.40	0.18	2.10	0.30

2 结果与分析

2.1 扎龙湿地 NPP 的时间变化特征

利用 ENVI 5.2 统计扎龙湿地自然植被和农作物的 NPP (图 3), 分析可知, 扎龙湿地有水草甸 NPP 多年平均值为 $483.33\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 变化范围在 $154.23\text{--}712.59\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 结合 Mann-Kendall 检验与 t 检验, 得出 NPP 平均值呈显著线性增加趋势 ($\text{sig.}=0.020$), 平均增加速度 $C\ 4.53\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 无水草甸 NPP 多年平均值为 $485.99\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 变化范围为 $227.16\text{--}710.99\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值增加趋势不显著 ($\text{sig.}=0.090$); 农作物多年平均 NPP 为 $448.70\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 变化范围为 $255.54\text{--}590.03\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值呈显著增加趋势 ($\text{sig.}=0.016$), 平均增加速度为 $4.27\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.2 扎龙湿地 NPP 空间变化特征

以 $20\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 为步长将 NPP 划分多个范围, 分别全区和各功能区统计 2000—2017 年像元频数

的分布 (图 4 和图 5)。从全区范围看, NPP 介于 $340.27\text{--}553.47\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 像元分布频数最大的区间是 $[460, 480]\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 核心区 NPP 平均值最高为 $513.75\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 像元分布频数最大的区间是 $[510, 540]\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 缓冲区居中, NPP 平均值和像元分布频数最大的区间分别是 $452.11\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和

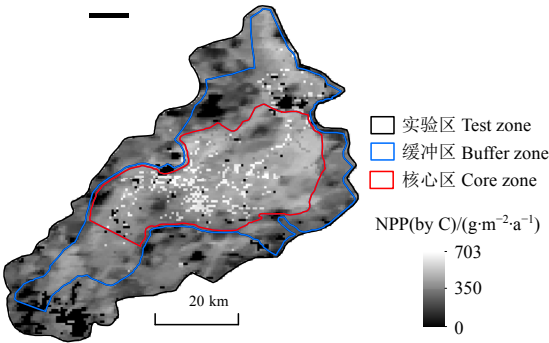


图 4 扎龙湿地多年平均 NPP 分布图
Fig. 4 Spatial distribution of annual mean NPP in Zhalong Wetland

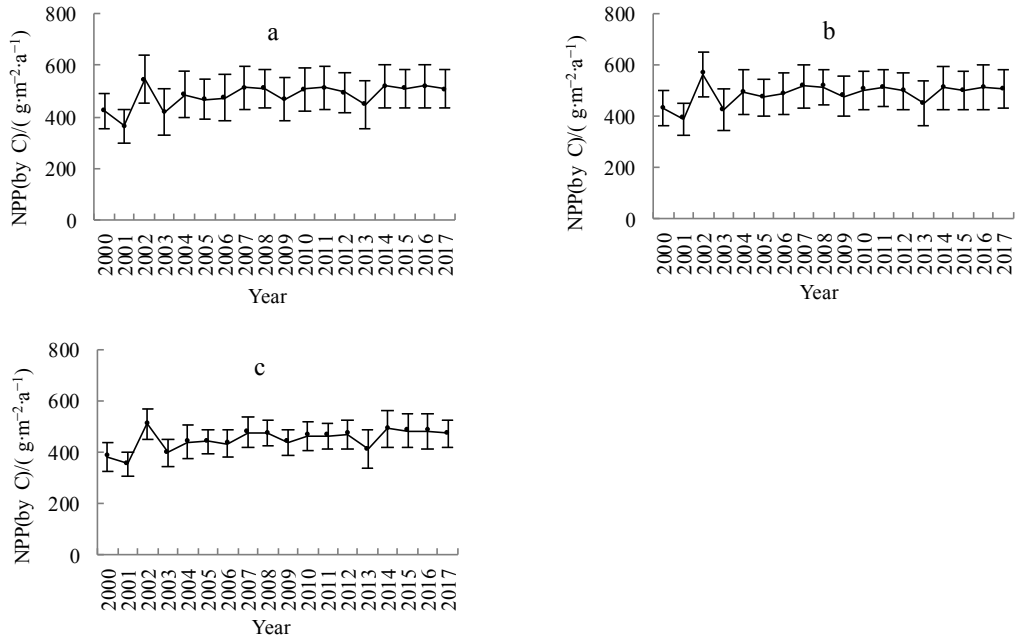


图 3 扎龙湿地植被 NPP 时间变化
Fig. 3 Interannual change of NPP in Zhalong wetland

a: 有水草甸 Watery meadow; b: 无水草甸 Waterless meadow; c: 农作物 Crop; $n=18$

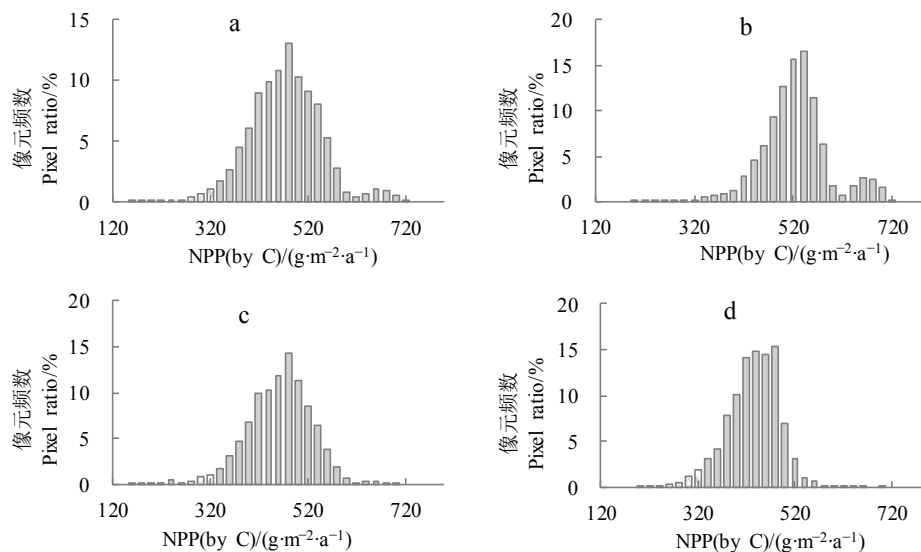


图5 2000—2017年扎龙湿地各功能区植被NPP分布区间统计

Fig. 5 Zonal statistics of NPP of different functional zones in Zhalong Wetland

- a——全部植被 All vegetation
b——核心区植被 Vegetation in core zone
c——缓冲区 Vegetation in buffer zone
d——试验区 Vegetation in test zone
 $n=9\ 273$

[460, 480] $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 试验区最低, 平均值和变化范围分别为 $422.80\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 [420, 470] $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2000—2017年NPP变化趋势如图6所示, 扎龙湿地大部分区域的NPP呈增加趋势, 占扎龙湿地总面积的86.76%, 其中平均每年以 $4.5-6.0\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度增加的像元所占比例较大 (占扎龙湿地总面积的6.37%—6.45%), 还有6.15%的像元没有变化, 这些像元多数是水体, 只有7.09%像元的NPP总体呈下降趋势, 主要分布在扎龙湿地南部的缓冲区和试验区内, 而且这些像元变化趋势的决

定系数多低于0.40, 下降趋势不显著。核心区NPP呈增加趋势的像元比例最大, 占该功能区面积的93.30%。

2.3 扎龙湿地NPP对气候因子变化的响应

2.3.1 单气候因子对NPP动态变化的贡献率

因子探测模块运行结果表明, 除积雪深度外, 其他气候因子对植被 (包括有水草甸、无水草甸和农作物) NPP动态变化均有显著性影响 ($\text{sig.} < 0.001$) (图7)。水分因子对3种植被NPP的总体影响力大于温度因子, 对水分的依赖程度由大到小排序依次

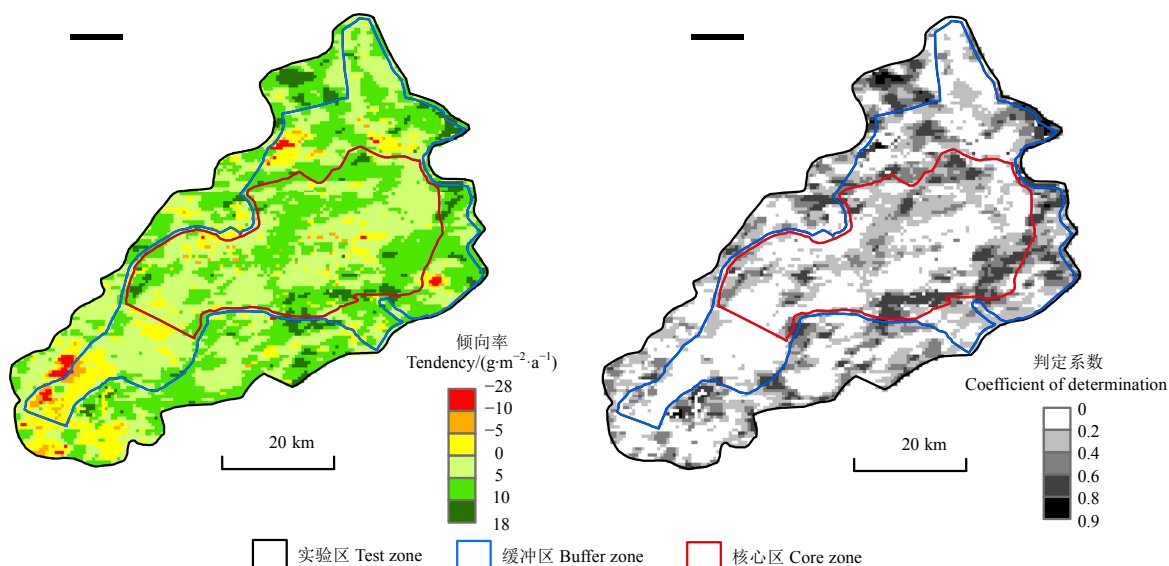


图6 扎龙湿地NPP变化趋势分布图

Fig. 6 Spatial change trend of NPP in Zhalong Wetland

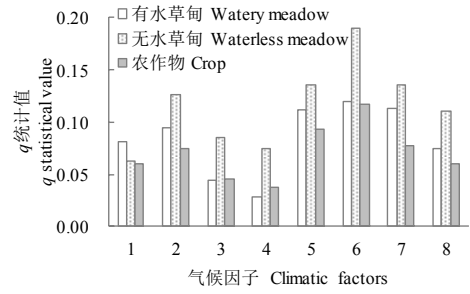


图7 气候因子 q 值统计

图7 q value of meteorological factors

1: 无霜期 Frost-free season; 2: 年降水量 Annual precipitation; 3: 年平均气温 Annual average temperature; 4: $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 Cumulative temperature; 5: 最暖月平均气温 Warmest average monthly temperature; 6: 4—10 月 EI EI form April to October; 7: 4—10 月日较差 Diurnal temperature range form April to October; 8: 4—10 月降水量 Precipitation form April to October

为无水草甸、农作物、有水草甸,原因是扎龙湿地处在东北地区中西部的半干旱区域,水分是植被分布和生长的主要限制因素,水分因素对有水草甸的影响小,另外,人为措施削弱了水分对农作物生长的影响。

在温度因子中,7月平均温度和4—10月日较差对植被 NPP 的影响较大,7月是该区域植被的生长旺盛期,而生长季の日较差大有利于植物干物质的积累。进一步分析可知,对温度的依赖程度由大到小排序依次为无水草甸、有水草甸、农作物,原因与人为的施肥、病虫害防治以及其他防灾减灾工作等农业生产措施削弱了自然因素对农作物的影响有关,温度因子对有水草甸的影响小于无水草甸的原因可能是水的比热容大于土壤,对温度变化的缓冲能力较强,从而减少了温度变化对植被生长的影响。

2.3.2 气候因子交互作用对 NPP 动态变化的影响

9 个气候因子交互作用探测结果表明,有 23 对气候因子两两交互作用增强了对有水草甸 NPP 动态变化的影响,13 对无增强作用,无呈减弱作用的

气候因子组合;无水草甸和农作物均有 26 对有增强作用,10 对无增强作用,无呈减弱作用的气候因子组合。同时也发现气候因子两两交互作用对无水草甸 NPP 动态变化的总体影响(q 平均值=0.274 9)最大,显著高于农作物($q=0.180\ 3$, $P=0.009$)和有水草甸($q=0.200\ 3$, $P=0.003$)

表 3 所示为对 NPP 动态变化影响大小排在前 3 位的交互作用因子,结果表明,温度因子之间的协同作用增强了对有水草甸 NPP 动态变化的影响,其中 4—10 月日较差和年平均气温的协同作用对有水草甸 NPP 动态变化的贡献率达 31.14%;温度和水分协同效应增强了对无水草甸 NPP 动态变化的影响,其中 4—10 月 EI 与年平均气温的协同作用对无水草甸 NPP 动态变化的贡献率达 37.85%;就农作物而言,温度因子之间的协同作用增强了对农作物 NPP 动态变化的影响,其中完成生活史所需的生长季长度和热量供应的协同作用对农作物 NPP 动态变化的影响贡献率达 29%。

2.3.3 NPP 高值区识别及影响因子层间 NPP 差异性分析

由于气候因子对扎龙湿地 NPP 空间分布的影响不同,利用地理探测模型风险探测模块识别 NPP 空间分布的高值区域(置信水平为 95%),探测单气候因子对 NPP 空间分布的影响能力,并判识由不同气候因子决定的各层间 NPP 差异的显著性,进而统计有显著差异的分层组合的百分比。结果如表 4,有水草甸、无水草甸和农作物的 NPP 高值区相近,尤其是对 NPP 影响力较大的 4—10 月 EI、4—10 月日较差和最暖月平均气温的高值区一致。

另外,根据有显著差异的分层组合百分比统计值可知,不同气候因子的层间 NPP 有显著差异的组合数比例较接近,范围在 64.44%—88.89%之间。就有水草甸而言,无霜期的层间差异最大,具有显著差异的百分比在 88.89%以上, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的层间差异较小,为 64.44%;就无水草甸而言,4—10 月日

表 3 气候因子交互作用对 NPP 动态变化的影响

Table 3 Impacts of the interactions of climate factors on NPP dynamics

Dominant interaction	Watery meadow	Waterless meadow	Corp
Dominant interaction 1	Diurnal temperature range from April to October $\times$ Annual average temperature	EI from April to October $\times$ Annual average temperature	Annual average temperature $\times$ Frost-free season
q	0.311 4	0.378 5	0.290 0
Dominant interaction 2	Diurnal temperature range from April to October $\times$ Warmest average monthly temperature	EI from April to October $\times$ Frost-free season	Annual average temperature $\times$ ($\geq 10^{\circ}\text{C}$) Cumulative temperature
q	0.298 1	0.369 2	0.278 0
Dominant interaction 3	Warmest average monthly temperature $\times$ Frost-free season	EI from April to October $\times$ Warmest average monthly temperature	Annual average temperature $\times$ Diurnal temperature range from April to October
q	0.286 3	0.361 1	0.278 0

$n=9\ 273$

表 4 不同气候因子层间 NPP 高值区域及平均值
Table 4 High and average values of NPP in different meteorological zones

Items	NPP types								
	Watery meadow			Waterless meadow			Crop		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Annual average temperature/℃	5.75–6.05	516.66	68.89%	4.85–5.15	476.41	80.00%	3.05–3.36	482.88	80.00%
≥10 ℃ Cumulative temperature/℃	3159.43–3200.10	494.81	64.44%	3159.43–3200.10	494.81	71.11%	2996.73–3037.4	482.79	71.11%
Warmest average monthly temperature/℃	24.11–24.46	516.16	84.44%	23.49–23.86	476.23	73.33%	23.49–23.86	489.06	75.56%
Frost-free season/d	166–169	510.08	88.89%	166–169	467.44	68.89%	169–172	465.87	71.11%
Annual precipitation /mm	612.47–662.13	514.73	82.22%	612.47–662.13	499.78	68.89%	562.99–612.69	497.24	68.89%
Precipitation from April to October/mm	394.72–444.08	519.78	75.56%	592.16–641.52	474.04	64.44%	345.44–394.84	498.1	66.67%
EI from April to October	1.55–1.73	531.10	84.44%	1.55–1.73	519.41	82.22%	1.55–1.73	494.1	71.11%
Diurnal temperature range from April to October/℃	10.35–10.63	503.06	86.67%	10.35–10.63	474.81	82.22%	10.35–10.63	474.86	80.00%

a: Influence factor range; b: Mean of NPP ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$); c: Percentage of stratified combinations with significant differences

较差的层间差异最大，具有显著差异的百分比在 82.22%以上，4—10 月降水量的层间差异较小，为 64.44%；就农作物而言，年平均气温和 4—10 月日较差的层间差异最大，均为 80%，4—10 月降水量的层间差异较小，为 66.67%。

3 讨论

3.1 水分条件对自然植被和农作物 NPP 动态变化的驱动机制

本研究发现，水分因子对扎龙湿地植被 NPP 的总体影响力大于温度因子。罗金明等（2018）对扎龙湿地的研究也表明，扎龙湿地绝大多数年份都会发生不同程度的干旱，水分条件一直是该区域植被生长的主要限制因素。分析原因应该与扎龙湿地所处的气候区有关，扎龙湿地位于东北地区中西部的半干旱区域，干燥度在 1.01—1.14 之间（中国科学院资源环境科学数据中心，<http://www.resdc.cn>），该区域气候干旱、年降雨量少、潜在沙漠化和盐碱化严重（殷志强等，2006）。

进一步分析水分条件对无水草甸、有水草甸和农作物的 NPP 的影响程度，发现无水草甸对水分的依赖程度大于农作物和有水草甸，原因与人为干预程度有关：对于自然植被，当地的管理措施主要是保护和每年定量的人工补水，但当发生流域性干旱时，人工补水量难以保证自然植被对水分的需求，而无水草甸只能依赖自然降水；而对于农作物的管理，当地一直有春季坐水（坐水播种是一种有效抗旱保种的播种方式，播种过程为浇水—投种—覆土）、夏季灌溉的耕作管理措施，在很大程度上减弱了干旱对农作物生长的影响，因此出现水分条件对自然植被 NPP 空间异质性的影响程度大于农作物的现象，这也说明人类管理因素可以有效减缓干旱对农作物的影响，从而提高农作物对气候变化的

适应能力。

3.2 气候因子交互作用对植被 NPP 变化的驱动机制

植物生境和植物生理过程的复杂性决定了其影响因子不会是单一的，而是两项或多项因子之间的共同作用，因此影响因子耦合作用方式和程度的探讨仍是目前 NPP 动态变化驱动力研究的难点。本研究表明，与单一气候因子相比，两两气候因子的交互作用增强了气候因子对 NPP 变化的驱动能力，例如 4—10 月 EI 与年平均气温的协同作用对无水草甸 NPP 动态变化的贡献率达 37.85%，远远大于其单个气候因子影响力之和（单独 4—10 月 EI 的贡献率为 13.51%，年平均气温的贡献率为 8.55%），说明气候影响因子的交互作用对植被 NPP 动态变化的影响并不是单气候因子的简单加和，这与 Zhou et al.（2008）的研究结论一致。

本研究发现，即使两两气候变量的协同作用增强了其对 NPP 动态变化的解释能力，其最大的贡献率也只有 37.88%，说明其他因素对 NPP 动态变化还有较大影响，例如火灾对植被 NPP 的降低有着决定性的作用，孔博等（2007）统计表明 2001—2005 年扎龙湿地发生了 2 次较大规模的火灾，本研究基于 MOD14A2 数据统计发现，扎龙湿地每年都有火灾发生，而且火灾面积有显著上升趋势。另外水体中磷和氮的富集（罗金明等，2014）、CO₂ 浓度增加（刘舒，2018）等都会对植被 NPP 变化产生影响。

另外，在土壤、养分和 CO₂ 浓度等非气候条件最适宜的条件下，植被可以充分利用当地的光、热、水等气候资源形成其气候生产潜力（Qin et al., 2015）。然而，本研究发现不同气候因子的层间 NPP 有显著差异的组合数比例超过了 65%，说明研究区的两两气候因子的组合很少达到植被生长所需的

最佳条件, 也说明研究区植被的生产力并未达到该区域的气候生产潜力, 因此加强对各类生态系统的管理对于提高区域植被 NPP 仍有较大潜力。

3.3 研究中存在的不足

在 NPP 估算模型的选择上, 本研究用 2017 年地面调查获得的 NPP 数据对不同模型同时期的估算值进行了比较分析, 尽管最后得出 CASA 模型的估算结果更接近实测值, 但由于近 20 年间湿地的植被覆盖类型发生了变化 (于成龙, 2018), 而不同植被类型的光能利用率存在很大差异, 因此应用 CASA 模型推算近 20 年的 NPP 会产生一定误差。但由于本研究积累的地面调查数据的时间长度有限, 未能验证 CASA 模型的时间有效性, 在今后的研究中, 随着地面调查资料时间序列的延长, 可通过验证多种 NPP 推算模型的真确性、有效性和有用性, 筛选出更适合的推算模型。

尽管本研究定量评价了单气候因子及其交互作用对扎龙湿地植被 NPP 动态变化的影响, 但本文并没有探讨气候因素对 NPP 动态变化的延迟影响以及 NPP 对气候变化响应的渐变及累积突变特征。另外, C4 植物和 C3 植物在应对高温干旱时采取的策略有所差异 (Wilson, 2007; Killi et al., 2017), 但本研究并没有对其进行明确区分, 这也是今后研究中需要解决的问题。

4 结论

2000—2017 年, 扎龙湿地植被 NPP 年平均值为 $478.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中有水草甸为 $483.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 无水草甸为 $485.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 农作物为 $448.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 有水草甸和农作物的 NPP 年平均值均呈显著增加趋势, 有水草甸的 NPP 年平均增加幅度大于农作物。

扎龙湿地核心区 NPP 平均值最高, 为 $513.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 试验区 NPP 年平均值最低, 为 $422.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 从空间分布看, 2000—2017 年间扎龙湿地 86.76% 区域的 NPP 呈增加趋势, 其中 93.30% 的核心区 NPP 呈增加趋势。

水分因子对植被 NPP 的总体影响力大于温度因子, 对水分的依赖程度由大到小排序依次为无水草甸、农作物、有水草甸, 对温度的依赖程度由大到小排序依次为无水草甸、有水草甸、农作物。

气候因子两两交互作用对自然植被 NPP 动态变化的总体影响显著大于农作物, 其中 4—10 月 EI 和年平均气温的协同作用对无水草甸 NPP 动态变化变化的贡献率达 37.85%, 4—10 月日较差和年平均气温的协同作用对有水草甸 NPP 动态变化的贡献率达 31.14%, 年平均气温和无霜期的协同作用对农作物 NPP 动态变化的贡献率达 29.00%。

参考文献:

- CHAVEZ P S, BERLIN J G L, SOWERS L B, 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios [J]. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8(1): 23-30.
- DOUGHTY C E, METCALFE D B, GIRARDIN C A J, et al., 2015. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia [J]. *Nature*, 519(5): 78-82.
- DUFFY J E, 2006. Biodiversity and the functioning of seagrass ecosystems [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 311: 233-250.
- FENG X Q, ZHANG G X, XU Y J, 2013. Simulation of hydrological processes in the Zhalong wetland within a river basin, Northeast China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7): 2797-2807.
- FORZIERI G, FEYEN L, CESCATTI A, et al., 2014. Spatial and temporal variations in ecosystem response to monsoon precipitation variability in southwestern North America [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(10): 1999-2017.
- ITO A, 2011. A historical meta-analysis of global terrestrial net primary productivity: are estimates converging? [J]. *Global Change Biology*, 17(10): 3161-3175.
- KILLI D, BUSSOTTI F, RASCHI A, et al., 2017. Adaptation to high temperature mitigates the impact of water deficit during combined heat and drought stress in C3 sunflower and C4 maize varieties with contrasting drought tolerance [J]. *Physiologia Plantarum*, 159(2): 130-147.
- KURSE J, RENNENBERG H, ADAMS M A, 2018. Three physiological parameters capture variation in leaf respiration of *Eucalyptus grandis*, as elicited by short-term changes in ambient temperature, and differing nitrogen supply [J]. *Plant, Cell & Environment*, 41(6): 1369-1382.
- LEITH H, BOX E, 1972. *Evapotranspiration and primary productivity* [M]. New Jersey: Climatology.
- LEITH H, WHITTAKER R H, 1975. Modeling the primary productivity of the world [J]. *Primary Productivity of the Biosphere*, 4: 237-263.
- LI W, CIAIS P, WANG Y L, et al., 2018. Recent changes in global photosynthesis and terrestrial ecosystem respiration constrained from multiple observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 45(2): 1058-1068.
- LUO T X, PAN Y D, OUYANG H, et al., 2004. Leaf area index and net primary productivity along subtropical to alpine gradients in the Tibetan Plateau [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 13(4): 245-358.
- MICHALETZ S T, 2018. Evaluating the kinetic basis of plant growth from organs to ecosystems [J]. *New Phytologist*, 219(1): 37-44.
- MURRAY-TORTAROLO G, FRIEDLINGSTEIN P, SITCH S, et al., 2016. The dry season intensity as a key driver of NPP trends [J]. *Geophysical Research Letters*, 43(6): 2632-2639.
- MYNENI R, KNYAZIKHIN Y, PARK T, 2015. MOD15A2H MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006. NASA MODIS Collection 6 (C6) LAI/FPAR Product User's Guide [EB/OL]. [2015-04-24]. https://lpdaac.usgs.gov/documents/2/mod15_user_guide.pdf.
- PADFIELD D, LOWE C, BUCKLING A, et al., 2017. Metabolic compensation constrains the temperature dependence of gross primary production [J]. *Ecology Letters*, 20(10): 1250-1260.
- PENG D L, HUANG J F, CAI C X, et al., 2008. Assessing the Response of Seasonal Variation of Net Primary Productivity to Climate Using Remote Sensing Data and Geographic Information System Techniques in Xinjiang [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(12): 1580-1588.
- POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, et al., 1993. Terrestrial

- ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4): 811-841.
- QIN Z C, ZHUANG Q L, CAI X M, 2015. Bioenergy crop productivity and potential climate change mitigation from marginal lands in the United States: An ecosystem modeling perspective [J]. *Global Change Biology*, 7(6): 1211-1221.
- WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al., 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(1): 107-127.
- WILSON S D, 2007. Competition, resources, and vegetation during 10 years in native grassland [J]. *Ecology*, 88(12): 2951-2958.
- WOODWARD F I, 1987. Climate and plant distribution [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- XU C G, MCDOWELL N G, SEVANTO S, et al., 2013. Our limited ability to predict vegetation dynamics under water stress [J]. *The New Phytologist*, 200(2): 298-300.
- YAN H, WANG S Q, BILLESBACH D, et al., 2015. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants [J]. *Ecological Modelling*, 297: 42-59.
- ZHOU X H, WENG E S, LUO Y Q, 2008. Modeling patterns of nonlinearity in ecosystem responses to temperature, CO₂, and precipitation changes [J]. *Ecological Applications*, 18(2): 453-466.
- 白晓兰, 魏加华, 解宏伟, 2017. 三江源区干湿变化特征及其影响[J]. *生态学报*, 37(24): 8397-8410.
- BAI X L, WEI J X, XIE H W, 2017. Characteristics of wetness/dryness variation and their influences in the Three-River Headwaters region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(24): 8397-8410.
- 代存芳, 易映彤, 刘妍, 等, 2017. 扎龙湿地硅藻植物群落季节变化及其对环境的响应[J]. *生态学报*, 37(8): 2818-2827.
- DAI C F, YI Y T, LIU Y, et al., 2017. Seasonal changes of diatom community structure in the Zhalong wetland and its relationship with environmental conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(8): 2818-2827.
- 郭跃东, 何岩, 邓伟, 等, 2006. 扎龙国家自然湿地生态环境需水量研究[J]. *水土保持学报*, 18(6): 163-174.
- GUO Y D, HE Y, DENG W, et al., 2006. Research on eco-environment water demand of Zhalong national natural wetlands [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(6): 163-174.
- 方精云, 刘国华, 徐嵩龄, 1996. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 16(5): 497-508.
- FANG J Y, LIU G H, XU S L, 1996. Biomass and net production of forest vegetation in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 16(5): 497-508.
- 贾庆宇, 周莉, 谢艳兵, 等, 2006. 盘锦湿地芦苇群落生物量动态特征研究[J]. *气象与环境学报*, 22(4): 25-290.
- JIA Q Y, ZHOU L, XIE Y B, et al., 2006. Study on biomass dynamics of *Phragmites communis* community in Panjin wetland [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 22(4): 25-290.
- 罗金明, 王永洁, 柏林, 等, 2018. 扎龙盐沼湿地旱化特征及其对演替的影响[J]. *干旱区研究*, 35(5): 1167-1172.
- LUO J M, WANG Y J, BAI L, et al., 2018. Effect of drought stress on succession of the Zhalong wetland [J]. *Arid Zone Research*, 35(5): 1167-1172.
- 马楠楠, 2016. 扎龙自然保护区芦苇覆盖度动态变化及其对气候因子的响应[D]. 北京: 北京林业大学.
- MA N N, 2016. Reed coverage change in Zhalong Nature Reserve and its response to climate factor [D]. Beijing: Beijing Forestry University.
- 孟焕, 王琳, 张仲胜, 等, 2016. 气候变化对中国内陆湿地空间分布和主要生态功能的影响研究[J]. *湿地科学*, 14(5): 710-716.
- MENG H, WANG L, ZHANG Z S, et al., 2016. Research on the impacts of climate change on spatial distribution and main ecological functions of inland wetland ecosystem in China [J]. *Wetland Science*, 14(5): 710-716.
- 穆少杰, 游永亮, 朱超, 等, 2017. 中国西北部草地植被降水利用效率的时空格局[J]. *生态学报*, 37(5): 1458-1471.
- MU S J, YOU Y L, ZHU C, et al., 2017. Spatio-temporal patterns of precipitation-use efficiency of grassland in Northwestern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(5): 1458-1471.
- 庞丙亮, 崔丽娟, 马牧源, 等, 2014. 扎龙湿地生态系统固碳服务价值评价[J]. *生态学杂志*, 33(8): 2078-2083.
- PANG B L, CUI L J, MA M Y, et al., 2014. Carbon sequestration service valuation of Zhalong wetland ecosystem [J]. *Chinese Journal Ecology*, 33(8): 2078-2083.
- 任福民, 翟盘茂, 1998. 1951—1990年中国极端气温变化分析[J]. *大气科学*, 22(2): 217-227.
- REN F M, ZHAI P M, 1998. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951—1990[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 22(2): 217-227.
- 任岩, 张飞, 周梅, 等, 2016. 基于 Landsat 8 影像的水体指数与地表水化学特征关系: 以艾比湖流域为例[J]. *中国沙漠*, 36(5): 1451-1462.
- REN Y, ZHANG F, ZHOU M, et al., 2016. Relationship between water index and chemical characteristics of the surface water: a case study in the Ebinur Lake Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 36(5): 1451-1462.
- 佟守正, 吕宪国, 苏立英, 等, 2008. 扎龙湿地生态系统变化过程及影响因素分析[J]. *湿地科学*, 6(2): 179-184.
- TONG S Z, LU X G, SU L Y, et al., 2008. Changing process and the impact factors of wetland ecosystem in Zhalong wetland [J]. *Wetland Science*, 6(2): 179-184.
- 王红岩, 2013. 基于 NPP 和植被降水利用效率土地退化遥感评价与监测技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院.
- WANG H Y, 2013. Assessment and monitoring of land degradation using NPP and vegetation rain use efficiency [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry.
- 王永洁, 罗金明, 叶雅杰, 等, 2009. 季节性冻融对扎龙湿地演化的影响[J]. *水土保持学报*, 23(5): 34-38.
- WANG Y J, LUO J M, YE Y J, et al., 2009. Influence on Zhalong wetland succession by seasonal frozen-thawing action [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 23(5): 34-38.
- 魏凤英, 1999. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社.
- WEI F Y, 1999. Modern Climate Statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 徐涵秋, 2011. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. *生态学报*, 31(14): 3890-3901.
- XU H Q, 2011. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(14): 3890-3901.
- 于成龙, 刘丹, 2018. 扎龙湿地土地利用/覆盖类型时空演变及其气候响应[J]. *生态环境学报*, 27(11): 2117-2126.
- YU C L, LIU D, 2018. Spatiotemporal evolution of land cover types and response to climate change in Zhalong Wetland [J]. *Ecology and Environmental*, 27(11): 2117-2126.
- 殷志强, 秦小光, 刘嘉麒, 等, 2006. 扎龙湿地的形成背景及其生态环境意义[J]. *地理科学进展*, 25(3): 32-38.
- YIN Z Q, QIN X G, LIU J Q, et al., 2006. Formation background of the Zhalong wetland and its eco-environmental significance [J].

- Progress in Geography, 25(3): 32-38.
- 张强, 徐京华, 梁磊, 等, 2018. 基于 CASA 模型的干旱区农作物 NPP 估算[J]. 地理空间信息, 16(8): 106-108.
- ZHANG Q, XU J H, LIANG L, et al., 2018. Estimation of crop NPP in arid region based on CASA model [J]. Geospatial Information, 16(8): 106-108.
- 周广胜, 张新时, 1995. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 19(3): 193-200.
- ZHOU G S, ZHANG X S, 1995. A natural vegetation NPP model [J]. Acta Phytocologica Sinica, 19(3): 193-200.
- 朱志辉, 1993. 自然植被净第一性生产力估计模型[J]. 科学通报, 38(15): 1422-1426.
- ZHU Z H, 1993. Models for estimating NPP of natural vegetation[J]. Chinese Science Bulletin, 38(15): 1422-1426.
- 郑宝江, 马建华, 2008 扎龙湿地植物志[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社.
- ZHENG B J, MA J H, Zhalong wetland flora [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press
- 孔博, 张树清, 张柏, 等, 2007. 扎龙湿地火烧严重度分析及火灾对丹顶鹤生境的影响[J]. 湿地科学, 5(4): 348-355.
- KONG B, ZHANG S Q, ZHANG B, et al., 2007. Analysis of burn severity of wetlands in Zhalong Nature Reserve and impact of fire on red crowned crane habitat [J]. Wetland Science, 5(4): 348-355.
- 罗金明, 尹雄锐, 叶雅杰, 等, 2014. 人为扰动下扎龙湿地土壤环境对水质变化的影响[J]. 土壤通报, 45(2):450-456.
- LUO J M, YIN X R, YE Y J, et al., 2014. Impacts of edaphic environments on water quality under artificial distribution in the Zhalong wetland [J]. Chinese Journal of Soil Science, 45(2): 450-456.
- 刘舒, 2018. 吉林西部湿地分布及 NPP 时空动态变化研究[D]. 长春: 吉林大学.
- LIU S, 2018. Study on the spatial and temporal dynamic changes of wetland and its NPP in the west of Jilin Province based on remote sensing techniques [D]. Changchun: Jilin University.

Spatio-temporal Evolution and Climate Effect of NPP in Zhalong Wetland

YU Chenglong^{1, 2, 3}, LIU Dan^{1, 2, 3*}

1. Innovation and Opening laboratory of Regional Eco-Meteorology in Northeast, China Meteorological Administration, Harbin 150030, China;

2. Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China;

3. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China

Abstract: Net Primary Productivity (NPP) is an important indicator reflecting the response of terrestrial ecosystems to climate change. Zhalong Wetland is a typical representative of the wetland ecosystems which are sensitive to global climate change. So in this paper, Zhalong Wetland was chosen as the research area. And the analysis of its spatio-temporal pattern of NPP and response to the change of meteorological factors would provide references for studying the response process and driving mechanism of wetland carbon cycle under the background of climate change. Based on remote sensing and meteorological data, and by using Geo-Detector and platforms of GIS and RS, we estimated the spatio-temporal distribution characteristics of vegetation NPP and explored the spatial heterogeneity and the effect of meteorological factors on its dynamic evolution from 2000 to 2017. The results showed as follows. The annual average of vegetation NPP in Zhalong Wetland was $478.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (by C, the same below), which was $483.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in watery meadow, $485.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in waterless meadow and $448.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in crop. NPP of watery meadow and crop showed an increasing trend. The average value of NPP in the core area was the highest ($513.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), and was the lowest in the test area ($422.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). The whole influence of water factors on vegetation NPP was greater than that of temperature factors. The descending order of dependence on moisture was waterless meadow, crop and watery meadow, and that on temperature was waterless meadow, watery meadow and crop. The interaction effect of meteorological factors on dynamic change of natural vegetation NPP was significantly greater than that of crops. From April to October, the contribution rate of the synergistic effect of the EI and annual mean temperature on dynamic change of NPP in waterless meadow was 37.85%, while the contribution rate of diurnal temperature range and annual mean temperature on watery meadows was 31.14% and that of annual mean temperature and frost-free period on crop was 29.00%.

Key words: NPP; influencing mechanism; Geo-Detector; Zhalong Wetland