

气候变化对扎龙自然保护区植被生产力的影响

于成龙, 刘丹, 殷世平

(黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: [目的] 准确了解 2010 年以来扎龙自然保护区生态变化, 为提高湿地生态系统服务价值评估能力提供数据支持和理论参考。[方法] 基于遥感、气象、地面协同观测数据, 利用 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型、GSMSR (Geostatistical Model of Soil Respiration) 模型和回归分析等统计方法, 分析气候变化对 2010—2020 年扎龙自然保护区土地覆盖、植被生态质量、净生态系统生产力 (NEP) 等的影响。[结果] ① 扎龙自然保护区的主要土地覆盖类型为有水草甸, 占保护区面积的 37.24%, 主要分布在核心区, 但面积总体呈下降趋势; ② 植被覆盖度呈波动增长趋势, 年最高植被覆盖度平均为 74.62%; ③ 植被生态质量指数呈增加趋势, 2019、2020 年处于“好”等级; NEP 平均为 $253.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计), 呈现东高西低的空间分布特征; ④ 生长季平均固碳量为 $5.69 \times 10^5 \text{ t/a}$, 释氧量 $1.52 \times 10^6 \text{ t/a}$, 均存在上升趋势; ⑤ 气温对生态监测指标的影响大于降水量。[结论] 扎龙自然保护区是嫩江流域生态最为脆弱的区域, 植被生产力受气候影响大, 需要加强生态保护和修复。

关键词: 固碳释氧; 气候影响; 植被生产力; 净生态系统生产力; 扎龙湿地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0220-07

中图分类号: X171.1

文献参数: 于成龙, 刘丹, 殷世平. 气候变化对扎龙自然保护区植被生产力的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 220-226. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.026; Yu Chenglong, Liu Dan, Yin Shiping. Effects of climate change on vegetation productivity in Zhalong Nature Reserve [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 220-226.

Effects of Climate Change on Vegetation Productivity in Zhalong Nature Reserve

Yu Chenglong, Liu Dan, Yin Shiping

(Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: [Objective] The ecological changes in Zhalong Nature Reserve since 2010 were studied accurately in order to provide data support and theoretical references for improving the ability to assess the value of wetland ecosystem services. [Methods] Based on remote sensing, meteorology, and ground-based observation data, the impacts of climate change on land cover, vegetation ecological quality, and net ecological productivity in Zhalong Nature Reserve were analyzed using the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model, the Geostatistical Model of Soil Respiration (GSMSR) model, regression analysis, and other statistical methods. [Results] ① The main land cover type in Zhalong Nature Reserve was a water-bearing meadow, which accounted for 37.24% of the total area of the reserve, and was mainly located in the core area. This land cover type showed a downward trend over time in the area. ② Vegetation coverage showed a fluctuating growth pattern, with annual maximum vegetation coverage of 74.26%. ③ The vegetation ecological quality index showed an increasing trend and was characterized as being in the good level in 2019 and 2020. The average net ecological productivity (NEP) was $253.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ (calculated in C), and showed a spatial distribution pattern of higher in the east and lower in the west. ④ The average carbon fixation during the growing season was $5.694 \times 10^5 \text{ tons/yr}$, and the oxygen release was $1.517 \times 10^6 \text{ tons/yr}$, both of which showed upward trends. ⑤ The impacts of air temperature on ecological monitoring indicators were greater than the impacts of precipitation. [Conclusion] Zhalong Nature Reserve is the most ecologically fragile area

收稿日期: 2022-11-02

修回日期: 2023-01-10

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目“黑龙江省森林碳收支评估、预测及气候风险预警”(LH2022D023)

第一作者: 于成龙(1973—), 男(汉族), 黑龙江省桦川县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事生态气象方向研究。Email: nefuycl@163.com。

通信作者: 刘丹(1974—), 女(汉族), 黑龙江省加格达奇区人, 博士, 正高级工程师, 主要从事生态气象方向研究。Email: nefuliudan@163.com。

in Nenjiang River basin, and its vegetation productivity is greatly affected by climate. Therefore, it is necessary to strengthen ecological protection and restoration.

Keywords: carbon fixation and oxygen release; climate change impact; vegetation productivity; net ecological productivity; Zhalong wetland

湿地是地球上单位面积生态系统服务价值最高的生态系统类型,是陆地生态系统碳循环的重要组成部分^[1-2]。湿地内动植物资源丰富,在调节气候,涵养水源,降解环境污染,维持区域生态平衡等方面具有其他生态系统不可替代的作用。同时,湿地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^[3-4]。扎龙湿地位于黑龙江省西部乌裕尔河下游地区,是亚洲第一大芦苇湿地,所处区域气候干旱,年降水量少,潜在沙漠化和盐碱化严重^[5],监测扎龙湿地土地覆盖时空演变,评价其植被生态质量和固碳释氧能力,对于区域湿地资源的管理与保护,实现区域可持续发展具有重要意义。

近些年来,国内外学者就生态系统的固碳释氧能力做了大量研究,估算方式大致可分为2种,一种是基于森林资源清查等地面测量手段^[6-8]获得植被生物量,或基于遥感反演方法获得净初级生产力(net primary productivity, NPP)^[9-10],进而推算固碳量和释氧量。生态系统固碳能力主要由植被的光合作用、植物自养呼吸和土壤微生物的异氧呼吸过程决定,在碳收支过程中,植被光合作用所固定的碳减去植物自养呼吸消耗的碳得到NPP,而进一步减去土壤微生物的异氧呼吸消耗的碳得到净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP),只有在NEP为正值时,生态系统才处于碳汇状态。同时,植被在光合作用时所释放的氧气需要减去植物自养呼吸和土壤异氧呼吸消耗的氧气的差值。如果该值为正值,生态系统处于释氧状态,否则处于耗氧状态。但很多报道往往只根据NPP估算固碳释氧能力,忽略了土壤异氧呼吸释放的碳和消耗的氧气,从而高估了生态系统的固碳释氧能力。另一种方法是基于过程模型模拟生态系统碳收支。例如simplified photosynthesis and evapotranspiration model (SIPNET)^[11-12], DAYCENT (the daily time-step version of the CENTURY biogeochemical model)^[13-14], DeNitrification-Decomposition model (DNDC)等^[15-17]。这类模型将土壤—植物—大气过程耦合,既可进行点位尺度碳收支的估算,也可进行区域尺度转换,并与遥感数据相结合进行区域乃至全球碳收支的估算^[18]。但该类模型结构复杂,所需参数较多,而且难以获得,模型参数的空间代表性存在较大的不确定性。

本研究基于遥感、气象、DEM、地面同步观测等数据,以模拟湿地生态系统NEP为切入点,评估2010—2020年保护区生态系统格局、植被生态质量和固碳释氧量,分析气候变化对生态系统的影响,为明确扎龙湿地生态系统服务价值及发展变化趋势,提高生态系统服务价值评估能力提供数据支持和理论参考。

1 研究区概况

扎龙自然保护区位于黑龙江省西部乌裕尔河下游地区,地理坐标为123°47′—124°37′E, 46°52′—47°32′N,属湿地生态系统类型的自然保护区,总面积约2 250 km²,乌裕尔河是形成和维持扎龙自然保护区湿地生态系统的主导水源^[19]。研究区的气候类型属温带大陆性季风气候,根据“中国地面气候资料日值数据集V3.0”提供的1980—2010年扎龙自然保护区及周边约100 km缓冲区内的气象观测站逐日平均数据统计,年平均气温为4.34℃,年平均降水量为429.00 mm,平均日照时数为7.41 h/d。

2 数据与方法

2.1 遥感数据

本研究应用Landsat的一级数据进行土地覆盖类型提取,该数据来自于美国地质调查局(网址为: <http://glovis.usgs.gov/>),2010年为Landsat 5/TM数据,2015年和2020年为Landsat 8/OLI_TIRS数据,数据原始地理坐标系统为WGS84,UTM带号为51,将数据的投影均转为Albers投影,并将空间分辨率统一为30 m。

2.2 地面观测数据

气象观测数据来源于黑龙江省气象局,空间范围均为乌裕尔河流域的6个气象观测站,数据均为逐日资料,本研究提取气温和降水2个要素数据。站点的地理位置见图1。于2017年8月末和9月初分别2次通过建立样方(1 m×2 m)进行实地调查和取样,采样点(控制区域为30 m×30 m)共55个,多数采样点在控制区域范围内选择2个样方,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。该数据用于对土地利用分类结果和NPP推算结果进行验证,其中NPP的模拟结果和验证方法见^[20]。

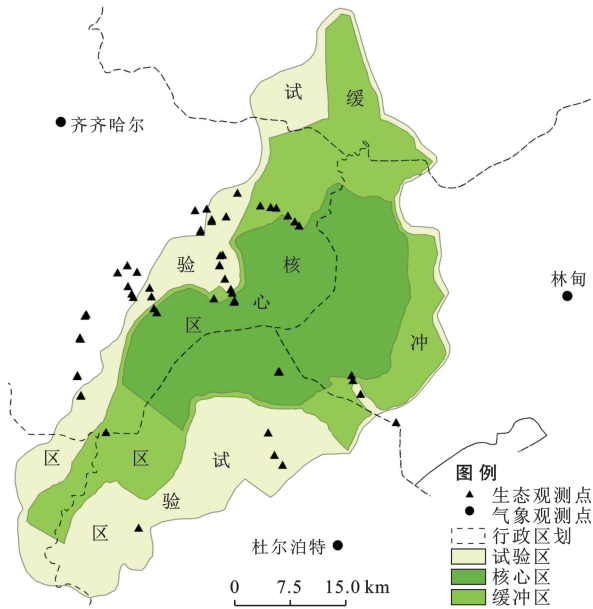


图 1 研究样点在扎龙自然保护区的分布

Fig.1 Location and distribution of research samples in Zhalong Nature Reserve

2.3 植被生态质量指数

因扎龙湿地为芦苇湿地,因此本研究引用《草地气象监测评价方法》(GB/T34814-2017)^[21]中的草地生态质量指数(Q_i)评价该湿地的植被生态质量, Q_i 值越大,表明植被生态质量越好,具体公式如下:

$$Q_i = 100(f_1 \times GVC_i + f_2 \times \frac{FB_i}{FB_m}) \quad (1)$$

式中: f_i 为草地植被覆盖度的权重系数,取 0.5; GVC_i 为第*i*年草地植被覆盖度; f_2 为草地牧草产量的权重系数,取 0.5; FB_i 为第*i*年产量; FB_m 为过去第 1 年至第 *n* 年中产量最大值。本研究用 NPP 代替产量以植被生态质量指数的距平百分率划分植被生态质量等级: $Q_i < -10\%$,生态质量差; $-10\% \leq Q_i < 10\%$,生态质量正常; $Q_i \geq 10\%$,生态质量好。

2.4 净生态系统生产力

$$NEP = NPP - R_s \quad (2)$$

式中:NEP 表示净生态系统生产力;NPP 表示净初级生产力; R_s 表示土壤异氧呼吸。本研究基于 GSMSR 模型推算土壤呼吸速率^[22],并利用刘霞^[23]和邓钰等^[24]的实测数据,验证 GSMSR 模型模拟湿地和草地土壤呼吸速率的适用性,因文献中描述的土壤呼吸观测地缺少对应的地理坐标,因此本研究只能根据文献所划定大致观测范围,将观测范围内模型模拟的土壤呼吸数据与测量数据进行对比分析,结果显示,刘霞^[23]观测的大兴安岭湿地土壤呼吸速率平均值为 $1.97 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计),本研究模拟值平均为 $2.04 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计);邓钰等^[24]观测的呼伦

贝尔草原土壤呼吸速率平均值为 $5.05 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计),本研究模拟平均值为 $4.87 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计)。由此可见,GSMSR 模型在模拟寒冷区域湿地和草地方面具有一定的适用性。再根据刘霞^[23]和邓钰等^[24]的研究结果推算土壤异氧呼吸速率占总呼吸速率的比例,推算扎龙湿地土壤异氧呼吸速率。

2.5 释氧量计算

植物吸收空气中的 CO_2 ,通过光合作用生成碳水化合物并释放氧气,以净初级生产力计,每固定 1 分子碳(化学符号为 C,相对原子质量为 12),对应释放 2 分子氧(化学符号为 O,相对原子质量为 16)。因此释氧量的计算公式为:释氧量 = $2.67 \cdot \text{GPP}$,单位为 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)。本研究将 NEP 替代公式中的 GPP(gross primary productivity),计算生态系统近似释氧量。

3 结果与分析

3.1 2010—2020 年乌裕尔河流域气象因子变化趋势

扎龙湿地是由乌裕尔河下游尾间湖形成的苇草湖沼,气象条件作为影响生态系统最活跃、最直接的驱动因子,影响着生态质量,关系着生态保护和建设成果。2010—2020 年乌裕尔河流域年平均气温介于 $2.40 \sim 4.4 \text{ }^\circ\text{C}$,并存在显著上升趋势($p < 0.05$),每 10 a 平均上升 $1.49 \text{ }^\circ\text{C}$;该区域年降水量介于 $267.83 \sim 667.65 \text{ mm}$,波动明显,在 2013 年、2019 年和 2020 年降水量超过 600 mm,2018 年低于 300 mm(图 2)。

3.2 扎龙自然保护区的主要土地覆盖类型变化

扎龙自然保护区的主要生态系统包括无水草甸、有水草甸、水体、耕地和其他用地(图 3),其中有水草甸是面积最大的生态系统,面积平均为 837.94 km^2 (2010 年、2015 年和 2020 年平均值),占全区总面积的 37.24%,主要分布在核心区;第二大生态系统为无水草甸,面积平均 557.77 km^2 ,占全区总面积的 24.79%,与有水草甸共同构成缓冲区的主要生态系统类型(图 4)。可见扎龙自然保护区形成了以有水草甸为核心,外围由无水草甸、水体、耕地和其他用地包裹的生态格局。

分析变化趋势可见,水体(由 2010 年占研究区的 3.65%,到 2020 年的 6.30%)呈增加趋势,有水草甸(2010 年的 37.45%,到 2020 年的 35.72%)和无水草甸(2010 年的 26.71%,到 2020 年的 23.38%)呈减少趋势,耕地出现了先增加后减少的现象,2015 年最多(占研究区的 15.41%),2020 年最少(占研究区的 14.08%)。

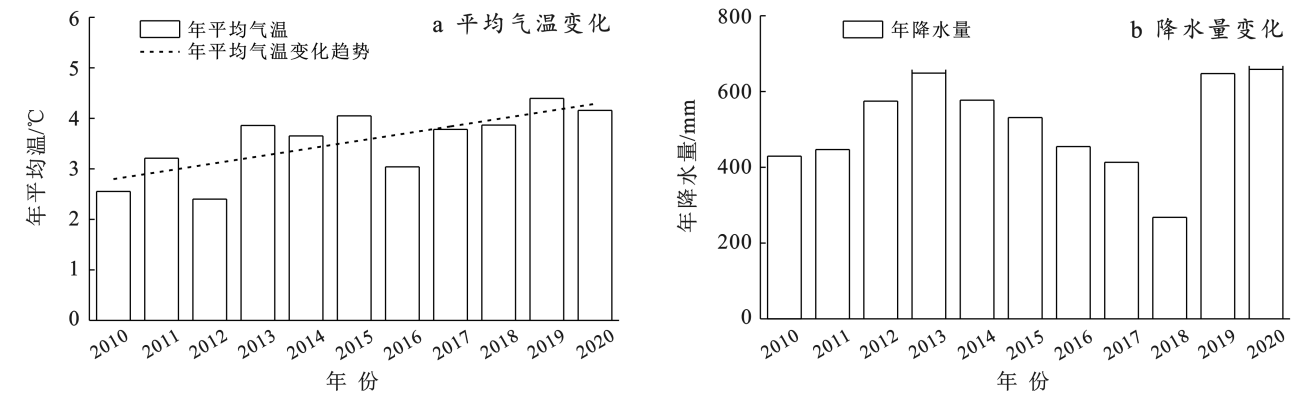


图 2 2010—2020 年乌裕尔河流域年平均气温和年降水量变化

Fig.2 Change of annual average temperature and annual precipitation in Uyu River basin from 2010 to 2020

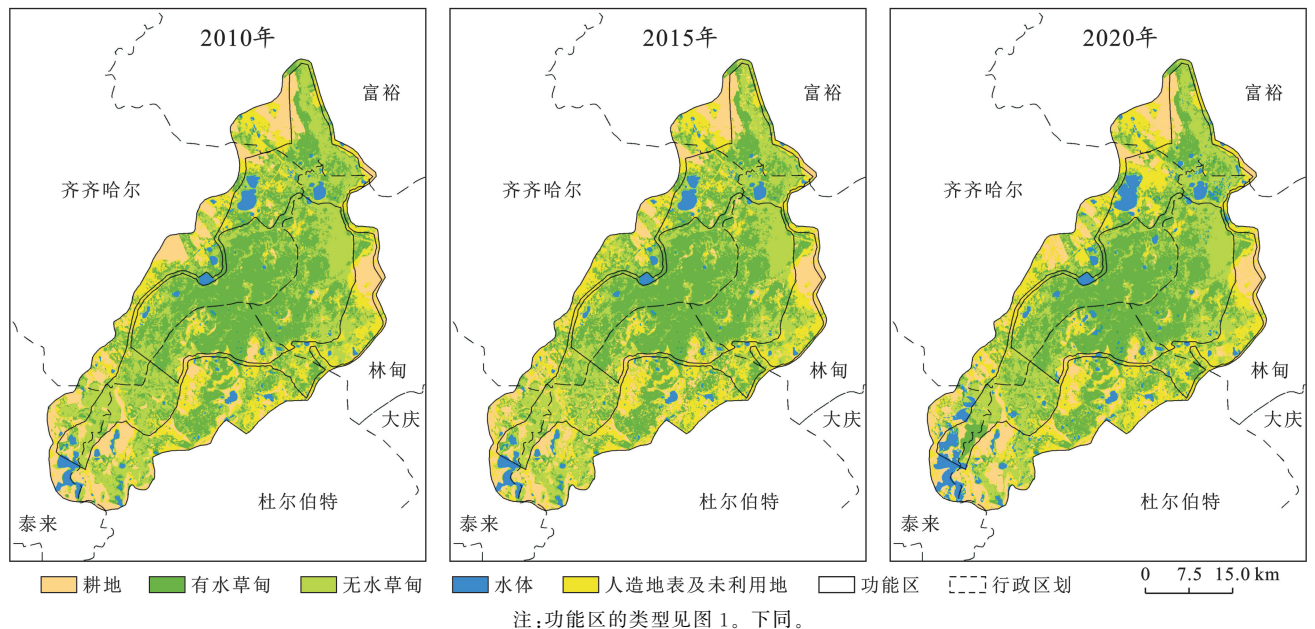


图 3 2010—2020 年扎龙自然保护区生态系统格局

Fig.3 Ecological system pattern of Zhalong Nature Reserve from 2010 to 2020

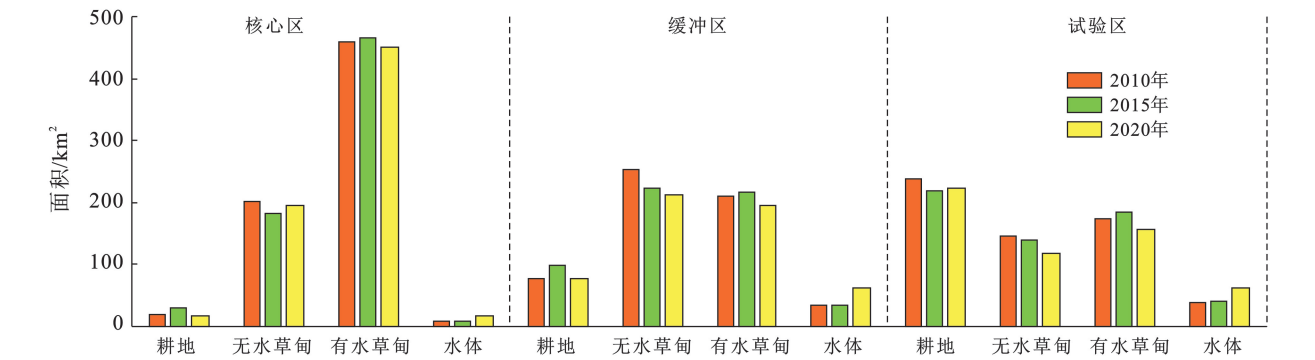


图 4 2010—2020 年扎龙自然保护区各功能区内不同生态系统面积

Fig.4 Different ecosystem areas within each functional area of Zhalong Nature Reserve from 2010 to 2020

3.3 植被生态质量变化

2010—2020 年,扎龙自然保护区每年最高植被覆盖度平均值的空间分布情况如图 5a 所示。保护区全区植被覆盖度平均为 74.62%,其中核心区最高(平均为 78.42%),缓冲区次之(平均为 74.01%),试验区较

低(平均为 71.43%)。图 5b 显示了生长季(5—9 月)自然保护区植被覆盖度平均值。2010 年以来该区植被覆盖度存在波动上升趋势,平均上升速度为每年 0.37%,其中 2018—2020 年植被覆盖度一直维持在较高水平。

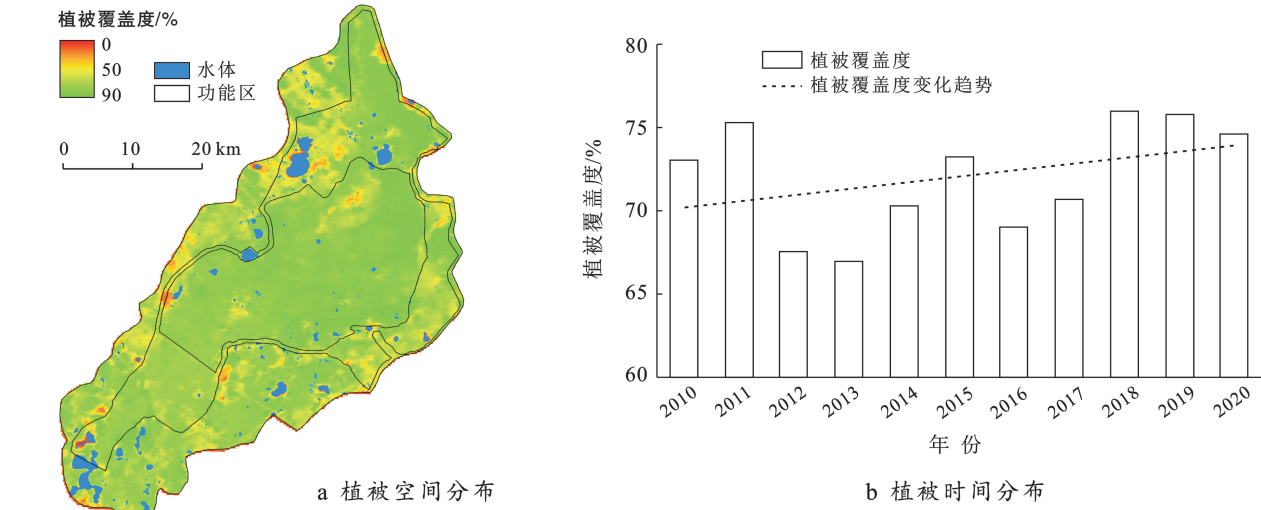


图 5 扎龙自然保护区植被覆盖度空间和时间分布
Fig.5 Spatial and temporal distribution of vegetation coverage in Zhalong Nature Reserve

应用植被生态质量表征湿地生态系统结构和功能状况。2000 年以来扎龙自然保护区植被生态质量指数呈显著增加趋势($p<0.05$, 见图 6), 其中 2019 年和 2020 年植被生态质量处于“好”等级, 其他年份除 2016 年和 2017 年外, 植被生态质量为“正常”。

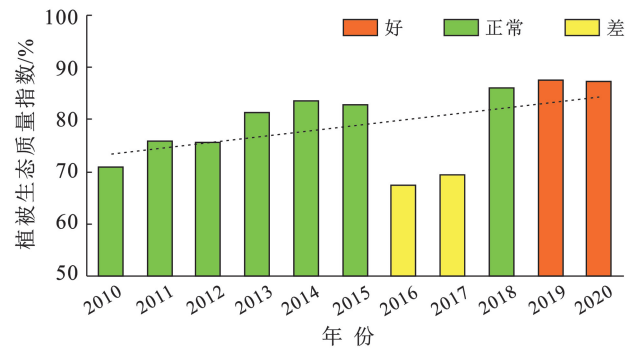


图 6 2010—2020 年扎龙自然保护区植被生态质量指数
Fig.6 Ecological quality index of vegetation in Zhalong Nature Reserve from 2010 to 2020

3.4 固碳释氧量变化

绿色植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳并释放氧气, 同时生态系统中的植物、动物和土壤微生物也吸收氧气并释放二氧化碳, NEP 是指净第一生产力中再减去异养呼吸所消耗的光合产物碳通过陆地生态系统循环的部分。2010—2020 年扎龙自然保护区 NEP 平均为 $253.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计), 其中东部区域较高, 局部可超过 $500 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计), 西部较低, 多数区域为 $200 \sim 300 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计) (图 7); 3 个功能区平均 NEP 接近, 由高到低依次为核心区、缓冲区和试验区。

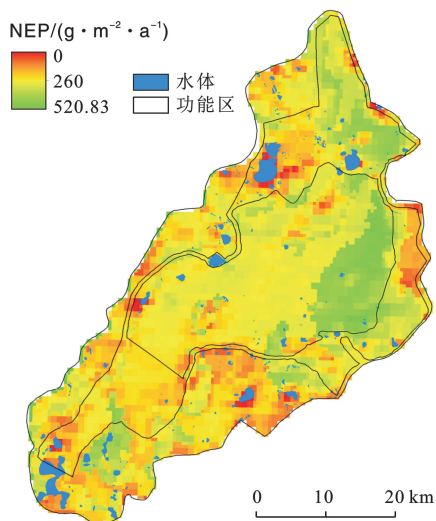


图 7 2010—2020 年扎龙自然保护区生长季 NEP 空间分布
Fig.7 Spatial distribution of NEP during growth season in Zhalong Nature Reserve from 2010 to 2020

2010—2020 年扎龙自然保护区生长季平均固碳量为 $5.59 \times 10^5 \text{ t/a}$, 并存在上升趋势 (图 8), 其中 2018—2020 年固碳量约为 $7.00 \times 10^5 \text{ t/a}$; 各功能区固碳量均呈上升趋势, 平均固碳量由高到低依次为核心区 ($2.01 \times 10^5 \text{ t/a}$)、试验区 ($1.92 \times 10^5 \text{ t/a}$) 和缓冲区 ($1.77 \times 10^5 \text{ t/a}$)。

2010—2020 年扎龙自然保护区生长季释氧量也呈上升趋势, 平均为 $1.52 \times 10^6 \text{ t/a}$, 各功能区由高到低依次为核心区 ($5.34 \times 10^5 \text{ t/a}$)、试验区 ($5.12 \times 10^5 \text{ t/a}$) 和缓冲区 ($4.71 \times 10^5 \text{ t/a}$)。

3.5 气象因子对生态监测指标的影响

分析气象因子与植被覆盖度 (图 9a 和图 9d)、生态质量指数 (图 9b 和图 9e) 和 NEP (图 9c 和图 9f) 之

间关系可见,气温与各生态因子均存在正相关关系,其中年平均气温与生态质量指数、年平均气温与 NEP 之间存在显著的线性正相关关系。降水与各生态因子之间的相关关系较气温弱,其中年降水量与植被覆盖度之间存在弱的负相关关系,因为有水草甸是扎龙湿地面积最大的土地覆盖类型,有水草甸内水位高会导致植被垂直投影面积减小,从而降低了植被覆盖度,但降水量与生态质量指数和 NEP 均存在正相关关系,说明降水有利于保护区生态系统的干物质积累。

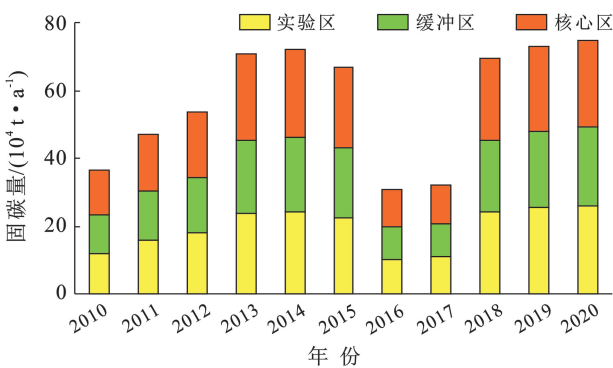


图 8 2010—2020 年扎龙自然保护区生长季固碳量
Fig.8 Carbon sequestration during growth season of Zhalong Nature Reserve from 2010 to 2020

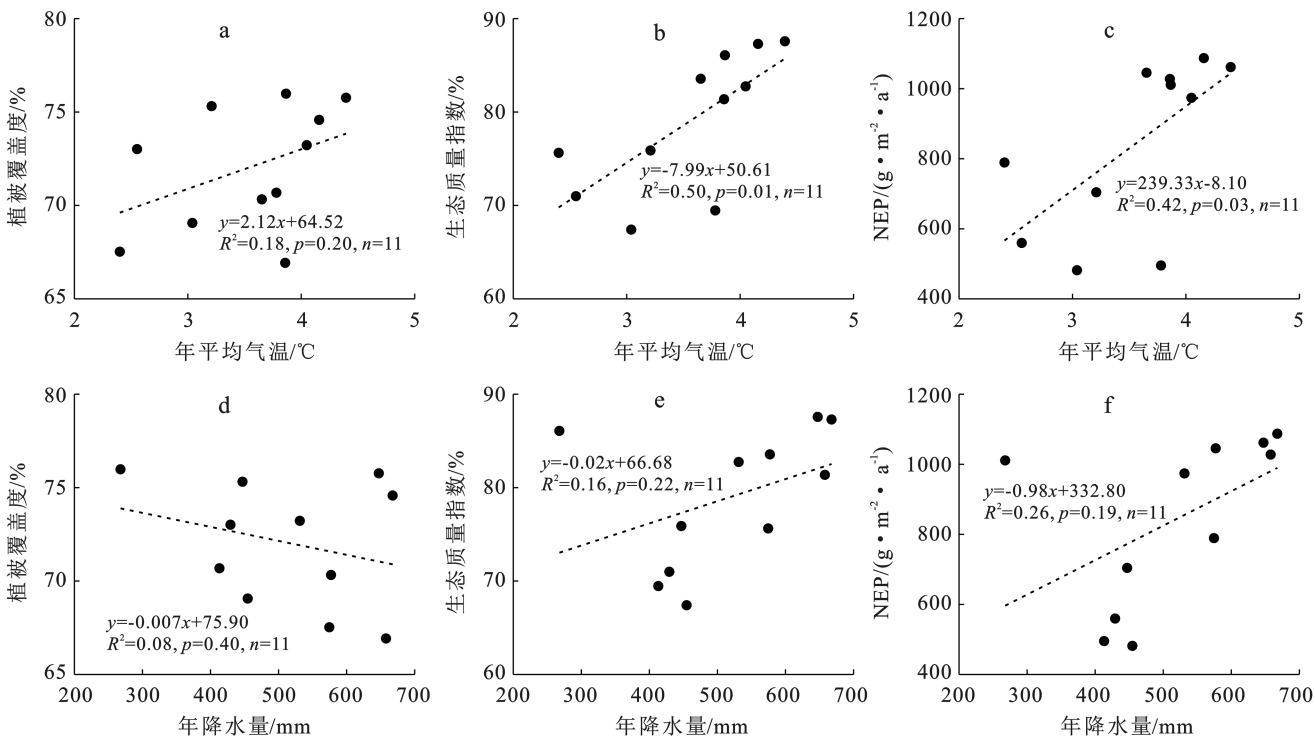


图 9 扎龙自然保护区气温和降水与生态监测因子的关系

Fig.9 Relationship between temperature, precipitation and ecological monitoring factors in Zhalong Nature Reserve

4 讨论与结论

采用遥感技术,分析和掌握区域植被覆盖与释氧量本底信息,对于实现保护区可持续发展目标具有重要的科学意义和应用价值。本研究基于多源数据,将多模型嵌套应用,开展 2010—2020 年扎龙自然保护区植被覆盖度、生态质量指数和 NEP 等的监测评估,结果显示,该区域的主要土地覆盖类型为草甸,水热条件基本利于植被生长和生态质量的提高,植被覆盖度、固碳释氧量总体呈增加趋势,气温对保护区生态监测指标的影响大于降水量。

扎龙湿地是在风成沙丘上形成的沼泽地^[5],湿地

内分布众多泡沼,蒸发强烈,土地盐碱化较普遍。根据中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供的“中国气象背景数据”,扎龙湿地的干燥度在 1.01~1.14 之间,属于半干旱区域。可见温度和水分条件都应该是该湿地发育的主要影响因素,但本研究在分析扎龙自然保护区生态监测指标与气象因子之间关系时发现,气温对扎龙湿地的植被覆盖度、生态质量指数和 NEP 的影响大于降水量,其原因可能与扎龙自然保护区对湿地人工补水活动有关。扎龙湿地是乌裕尔河下游尾间湖形成的苇草湖沼,湿地主要依靠乌裕尔河的补水来维持,但随着乌裕尔河两岸经济的发展,人们在河流上建立了大小几十座水

库来满足其生产生活用水需求,直接影响扎龙湿地天然补水过程(佟守正,2007),为维持扎龙湿地生态系统平衡,当地政府从 2001 年开始实行对扎龙湿地的生态补水工程。该工程根据气象部门的气候预测结果计算当年的生态补水量,人为控制扎龙湿地每年的总供水量,虽然能够为控制水分因素来研究温度因素对植被影响机制提供了基础条件,但如何区分天然降水和人工生态补水对植被的影响,成为本研究亟待解决的一个科学问题。

[参 考 文 献]

- [1] Burkett V, Kusler J. Climate change: potential impacts and interactions in wetlands of the United States [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000,36(2):313-320.
- [2] Anderson F E, Bergamaschi B, Sturtevant C, et al. Variation of energy and carbon fluxes from a restored temperate freshwater wetland and implications for carbon market verification protocols [J]. *Journal of Geophysical Research (Biogeosciences)*, 2016,121(3):777-795.
- [3] Lyu Zhou, Genet H, He Yujie, et al. The role of environmental driving factors in historical and projected carbon dynamics of wetland ecosystems in Alaska [J]. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2018,28(6):1377-1395.
- [4] Bernal B, Megonigal J P, Mozdzer T J. An invasive wetland grass primes deep soil carbon pools [J]. *Global Change Biology*, 2017,23(5):2104-2116.
- [5] 殷志强,秦小光,刘嘉麒,等.扎龙湿地的形成背景及其生态环境意义[J].*地理科学进展*,2006,25(3):32-38.
- [6] 孙中元,官静,苏爱锋,等.基于 GIS 的森林生态系统固碳释氧功能评估:以烟台市为例[J].*林业与生态科学*, 2020,35(4):405-413.
- [7] 鲁绍伟,李少宁,刘逸丰,等.北京市退耕还林生态效益评估[J].*生态学报*,2021,41(15):6170-6181.
- [8] 郑森.滦河上游 3 种林分类型固碳释氧效益估算[J].*水土保持研究*,2019,26(4):363-366.
- [9] 马琼芳,燕红,李伟,等.吉林省湿地生态系统固碳和释氧服务功能分析[J].*生态环境学报*,2021,30(12):2351-2359.
- [10] 乔亚军,张慧,刘坤,等.呼伦贝尔林草交错带植被固碳释氧功能变化及其驱动力研究[J].*水土保持研究*, 2022,29(5):164-170.
- [11] Zobitz J M, Moore D J P, Sacks W J, et al. Integration of process-based soil respiration models with whole-ecosystem CO₂ measurements [J]. *Ecosystems*, 2008, 11(2):250-269.
- [12] Braswell B H, Sacks W J, Linder E, et al. Estimating diurnal to annual ecosystem parameters by synthesis of a carbon flux model with eddy covariance net ecosystem exchange observations [J]. *Global Change Biology*, 2005,11(2):335-355.
- [13] Parton W J, Hartman M, Ojima D, et al. DayCent and its land surface submodel: description and testing [J]. *Global and Planetary Change*, 1998, 19 (1/2/3/4): 35-48.
- [14] Del Grosso S, Ojima D, Parton W, et al. Simulated effects of dryland cropping intensification on soil organic matter and greenhouse gas exchanges using the Day-Cent ecosystem model [J]. *Environmental Pollution*, 2002,116:S75-S83.
- [15] Li Changsheng, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1.model structure and sensitivity [J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 1992, 97 (D9):9759-9776.
- [16] Fumoto T, Kobayashi K, Li Changsheng, et al. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes [J]. *Global Change Biology*, 2008,14(2):382-402.
- [17] Gillespy S L, Anthony S, Cardenas L, et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): model evolution [J]. *Ecological Modelling*, 2014,292: 51-62.
- [18] Zhang Yu, Li Changsheng, Zhou Xiuji, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture [J]. *Ecological Modelling*, 2002,151(1):75-108.
- [19] 郭跃东,何岩,邓伟,等.扎龙国家自然湿地生态环境需水量研究[J].*水土保持学报*,2004,18(6):163-166.
- [20] Yu Chenglong, Liu Dan, Zhao Huiying. Evaluation of the carbon sequestration of Zhalong Wetland under climate change [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021,31(7):938-964.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.草地气象监测评价方法:GB/T 34814—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2018:10.
- [22] Yu Guirui, Zheng Zemei, Wang Qiufeng, et al. Spatio-temporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation [J]. *Environmental science & technology*, 2010,44(16):6074-6080.
- [23] 刘霞.寒温带冻土区森林—湿地生态系统土壤呼吸及其影响因子研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学, 2015.
- [24] 邓钰,柳小妮,闫瑞瑞,等.呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸及其影响因子对不同放牧强度的响应[J].*草业学报*, 2013,22(2):22-29.