DOI: 10.20103/j.stxb.202305291141

汤子同,李兴丽,刘华兵,李谦维,高俊琴.新疆科克苏湿地植被生物量时空分布特征及与水文连通的关系.生态学报,2024,44(7):3038-3048. Tang Z T, Li X L, Liu H B, Li Q W, Gao J Q. Spatiotemporal distribution characteristics of vegetation biomass and its relationship with hydrological connectivity in Kekesu Wetland, Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 3038-3048.

新疆科克苏湿地植被生物量时空分布特征及与水文连 通的关系

汤子同,李兴丽,刘华兵,李谦维,高俊琴*

北京林业大学生态与自然保护学院,北京 100083

摘要:区域植被生物量及其与水文连通之间的定量关系对于湿地保护和管理具有重要意义。基于多期 Landsat-8 遥感影像和野 外实地调查数据,提取了新疆科克苏湿地生长季不同月份的湿地水体斑块,反演并分析了湿地植被地上生物量及时空分布特 征,量化了水文连通与科克苏湿地植被地上生物量和植被碳库的关系。结果表明:6月新疆科克苏湿地水体斑块面积最大,占 保护区面积的 63.12%,之后湿地水体斑块面积逐渐减少,8月水体斑块面积仅占保护区面积的 6.27%,水体斑块分布具有明显 的季节性特征。科克苏湿地植被生物量呈现聚集分布的空间分布模式,额尔齐斯河及克兰河河道两侧以及支流两侧湿地为高 生物量区域,北部阿热勒齐及阔克苏村和东南部萨尔胡松乡为低生物量区域。7月地上生物量达到生长季最高值,该时段科克 苏湿地的植被总生物量为 1.09×10⁹ kg,最大总生物量为 4832 g/m²,地上生物量较高区域分布在西部的阿克铁热克村及东部的 巴勒喀木斯村。水文连通与植被地上生物量及植被碳库呈现抛物线关系,水文连通度为 0.6 左右时,植被地上生物量及植被总 碳库最大,植被总碳库达到 4.5×10¹¹ kg C。研究揭示了科克苏湿地植被生物量的时空分布特征,建立了科克苏湿地水文连通度 与植被地上生物量及植被碳库的量化关系,明确了适宜的水文连通度对植被生物量积累存在促进作用,可为湿地水文连通调控 和植被碳储存功能提升提供有效参考。

关键词:地上生物量;遥感反演;科克苏湿地;水文连通

Spatiotemporal distribution characteristics of vegetation biomass and its relationship with hydrological connectivity in Kekesu Wetland, Xinjiang

TANG Zitong, LI Xingli, LIU Huabing, LI Qianwei, GAO Junqin*

School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The relationship between vegetation biomass and hydrological connectivity is crucial for the preservation and effective management of wetland ecosystem. Our study combined the use of Landsat- 8 satellite imagery with the field measured data in Kekesu Wetland, Xinjiang, we not only extracted the wetland water patches of different months during the growing seasons but also estimated aboveground biomass of the wetland. We further investigated the spatial and temporal distribution characteristics of these vital ecological parameters. Additionally, we quantified the relationship between hydrological connectivity and aboveground biomass, as well as plant carbon pool. The results showed that in June, the area covered by water patches in Kekesu Wetland reached its maximum, accounting for 63.12% of the total reserve. However, as the growing season progressed, particularly in August, the extent of water patches diminished significantly, accounting for just 6.27% of the total area. This noticeable seasonal variation underscored the dynamic nature of water patch distribution within the wetland, emphasizing its sensitivity to changing environmental conditions. Exploring the spatial distribution of

收稿日期:2023-05-29; 网络出版日期:2024-01-12

基金项目:第三次新疆综合科考项目(2021xjkk0601);国家科技基础资源调查专项(2019FY100605)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gaojq@ bifu.edu.cn

vegetation biomass in more detail, we observed an aggregated spatial distribution pattern. High biomass concentrations were particularly prominent on both sides of the Irtysh River, the Kran River, and their intricate network of tributaries. In stark contrast, regions such as Azelqi and Kuokesu Villages in the northern sections, as well as Salhuson Township in the southeastern corner, exhibited considerably lower biomass levels. In July, the aboveground biomass reached its peak value during the growing season, with the total vegetation biomass in Kokesu Wetland reaching 1.09×10^{9} kg, and the maximum total biomass measuring 4832 g/m². The areas with higher above–ground biomass are distributed in Aktyrek Village in the west and Balkamus Village in the east. Moreover, we found a nonlinear association between hydrological connectivity and the ecological parameters of interest. The hydrological connectivity showed parabolic relationships with both aboveground biomass and plant carbon pool. The plant carbon pool was the highest when hydrological connectivity was approximately 0.6. The total plant carbon pool reached 4.5×10^{11} kg C. Our study reveals the spatiotemporal distribution characteristics of vegetation biomass in Kekesu Wetland, establishes a quantitative relationship between hydrological connectivity and aboveground vegetation biomass, as well as the plant carbon pool. Furthermore, we clarify the impact of appropriate hydrological connectivity on vegetation biomass accumulation, demonstrating its positive influence. This research can serve as a valuable reference for the management of wetland hydrological connectivity and the enhancement of vegetation carbon storage functionality.

Key Words: aboveground biomass; remote sensing inversion; Kekesu Wetland; hydrological connectivity

湿地生态系统拥有丰富的物种和较高的生产力,发挥着巨大的生态环境效益。植被生物量作为衡量生态 系统植物生产力和健康状况的重要指标,对湿地生态系统碳储存功能和物质循环具有关键影响^[1]。研究表 明,湿地植被生物量积累受水文过程调控,尤其是水文连通度、水位及其变化等^[2]。其中,水文连通度是指在 水文循环各要素内部和各要素之间,物质、能量及生物以水为媒介进行迁移和传递的顺畅程度^[3]。研究表 明,水文连通通过影响水分的供给、养分的供应及植物物种多样性等,直接或间接地影响湿地植物群落的生长 状况,从而影响植被生物量的大小^[4]。此外,水文连通还通过调整植被群落结构与分布格局,进一步影响植 被生物量及碳库分布格局^[5-6]。因此,维持适宜的水文连通有助于促进湿地内外物质和能量的交换,推动养 分循环,从而促进植物生长,增强湿地生态系统的固碳能力^[7-8]。然而,水文连通程度过高可能不利于某些植 物的生长,从而影响植被群落生物量的积累,降低生态系统碳输入及储存功能。因此,研究水文连通和植被生 物量之间的定量关系对于湿地生态系统的保护和管理具有重要的理论和实践意义。以往研究更多从定性角 度描述水文连通对植物、水生动物或微生物的分布或迁移的影响^[9],定量研究植被生物量的时空变化,而很 少揭示水文连通与植被生物量之间的定量关系,且不同区域和生态系统的适宜水文连通更可能存在差异,因 此需开展湿地水文连通与植被生物量的关系研究,为湿地保护管理以及水文连通调控提供科学支撑。

新疆科克苏湿地位于额尔齐斯河与其支流克兰河交汇的三角地带,包括河流、沼泽(森林沼泽和草本沼泽)、滩地等多种湿地类型^[10]。受阿尔泰山冰雪融水补给、克兰河水坝蓄水^[11]以及降水的影响,科克苏湿地 水体斑块及水文连通变化较强,具有明显的季节性特征,对植物生物量积累和植被碳库具有重要影响。目前 有关科克苏湿地的研究主要集中在水文情势变化^[12]以及植物物种或群落分布上^[13-14],而水文连通与植被生 物量的关系还很不明确。因此,为了阐明科克苏湿地植被地上生物量的时空分布特征及其与水文连通的关 系,本研究基于 landsat-8 影像和野外实测数据反演科克苏湿地生长季不同月份的植被地上生物量,并通过提 取和计算湿地斑块的水文连通度,建立水文连通与植被地上生物量及植被碳库之间的量化关系,为科克苏湿 地的植被保护管理以及水文连通调控提供科学支撑。

1 研究区概况

科克苏湿地国家级自然保护区位于新疆阿勒泰市西南部(47°28'31"—47°40'9"N,87°9'12"—87°34'59"

E),克兰河与额尔齐斯河交汇处^[13](图1)。保护区总面积约307 km²,海拔高度476—796 m,年平均温度 4.9 ℃,年平均降水量和蒸发量分别为112.6 mm和2000 mm,属于温带大陆性干旱半干旱气候^[13]。科克苏湿 地国家级自然保护区是新疆北部最大的沼泽湿地,植物资源丰富,白柳、吐伦柳、布尔津柳、灰毛柳等仅分布于 此,额尔齐斯河木蓼、雪白睡莲、阿勒泰菱角等为该区特有物种^[10]。科克苏湿地作为额尔齐斯河国际生物廊 道的重要区段,为水生野生动物和河谷植物提供了良好的栖息和繁衍环境^[14]。



图 1 科克苏国家级自然保护区范围及实验样点分布图 Fig.1 Map of Kekesu national nature reserve and sample point distribution

2 数据与方法

2.1 影像数据来源与处理

本研究使用的遥感影像为 Landsat-8 OLI 数据,数据来源于美国 USCS 地球资源观测与科学中心(http://earthexplorer.usgs.gov/)。科克苏湿地具有明显的季节性特征,一般在 6 月上旬上游克兰河托克孜塔劳段拦河 闸开闸放水,对科克苏湿地进行生态补水;8 月科克苏湿地积水逐渐消退,此时牧民会进行植被刈割^[15],为牲 畜提供草料,解决冬春饲草不足的问题。因此,6—8 月植被地上生物量与湿地水体斑块变化较为明显。本研 究选取 2022 年 6 月、7 月和 8 月影像进行水体斑块提取、水文连通计算以及植被地上生物量反演。使用 ENVI5.3 中的 Radiometric Calibration 工具及 FLAASH 工具对影像进行辐射定标和大气校正,根据研究区范围 对影像进行剪裁。

2.2 湿地水体斑块提取

采用 WIW 法以及 WI₂₀₁₅水体指数相结合对科克苏湿地的水体斑块(包含被地表植被覆盖的沼泽)进行提取。WIW 法^[16]公式如下:

Landsat8: WIW = NIR $\leq 0.1735 \pm \text{SWIR2} \leq 0.1035$;

WI₂₀₁₅水体指数^[17]:

 $WI_{2015} = 1.7204 + 171 \text{GREEN} + 3 \text{RED} - 70 \text{NIR} - 45 \text{SWIR1} - 71 \text{SWIR2};$

计算完成后在 IDL 中采用 OATU 大津法识别 WI2015水体指数阈值,利用阈值对湿地水体进行提取。根据

研究区已有 Landsat 全色影像进行人工目视校正,校正后的水体在 ArcGIS 10.8 中生成 100 个随机点,利用新 疆科克苏湿地已有资料,采用二分类混淆矩阵对已提取斑块精度进行评价。提取结果的总体解译精度在 90%以上,Kappa 系数为 78.99%,提取精度较高。

2.3 湿地水文连通度计算

根据景观连通度原理,计算可能连通性指数(probability of connectivity index, PC)及斑块重要性指数 dPC。 PC 可以评估整体的水文连通可能程度,但它缺乏评估单个水体斑块重要性的能力。因此,为了识别单个斑块的水文连通度,用 dPC_i 来表示单个斑块 *i* 与其他斑块的连通度^[18-19]。

2.3.1 阈值选取

连通度指数的计算需要确定湿地水体斑块间连通的距离阈值^[20]。距离阈值是保证斑块连通的最小值, 当斑块间的距离大于阈值时,则认为斑块间不连通;当斑块间的距离小于或等于阈值时,则认为斑块间是连通 的^[21]。距离阈值是通过整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, IIC)和可能连通性指数(Probability of Connectivity Index, PC)的变化计算确定, IIC 和 PC 计算公式如下^[18,22]:

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left[\frac{a_i \times a_j}{1 + nl_{ij}} \right]}{A_L^2}$$
$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_i \times a_j \times P_{ij}}{A_L^2}$$

式中,*n*为研究区域斑块数目,*a_i*和 *a_j*是斑块 *i* 和 *j* 的面积,*nl_{ij}*为斑块 *i* 和 *j* 之间的最小连接数目。 P_{ij}^* 为斑块 *i* 和 *j* 之间各个扩散路径的最大乘积概率,由斑块边与边之间距离的递减函数获得,表征 *i* 和 *j* 之间不经过其他 斑块而直接相连的可行性。当两个斑块彼此完全隔离时, $P_{ij}^* = 0$;当 *i* = *j* 时 $P_{ij}^* = 1$,*A*_L为研究区总面积。IIC 的取值范围为 0—1,IIC=0 时,斑块之间没有连接,IIC=1 时,整个区域都为生境斑块。PC 的取值范围为 0—1,PC 越大,斑块之间连通的可能性越大。

为减小随机性,合理确定稳定的距离阈值,本文选取三幅不同年份相同月份的影像进行 IIC 和 PC 的计算。当两个连通性指数(IIC 和 PC)不随距离产生较大变化时(即斜率接近于 0),可以确定为稳定的距离阈值。结果显示,研究区域不同年份的整体连通性指数 IIC 和可能连通性指数 PC 呈现一致的变化趋势,IIC 和 PC 随距离阈值的增加而增加(图 2)。距离阈值为 50—400 m 时,IIC 和 PC 迅速增长,此区间内斑块的连通性不稳定,易受阈值影响。距离阈值为 400—600 m 时,IIC 和 PC 增长但趋近于平稳,区域内斑块连通性较稳定,受阈值变化影响较小。距离阈值大于 600 m 时,IIC 和 PC 保持平稳,整个生境内的斑块被认为是连通的^[21]。综上,将计算水文连通度的距离阈值定为 600 m。

2.3.2 水文连通度指数计算

利用 Conefor Sensinode 2.6 软件计算水文连通度指数。使用 ArcGIS 10.8 软件中的 Conefor 插件,生成计 算连通度指数所需的节点和连接文件,将节点和连接文件在 Conefor Sensinode 2.6 中打开,输入阈值距离以及 研究区面积,计算水文连通指数。斑块重要性指数 dPC 可表示某个斑块对区域整体水文连通度的贡献程度, 计算公式如下^[18]:

$dPC_i = 100 \times (PC - PC')/PC$

式中,*PC*为研究区原本连通性指数,*PC*′为去除单个斑块*i*后的连通性指数,dPC_i用来指示单个斑块*i*对整个 区域连通性的贡献程度,同时,dPC_i可在一定程度上反映斑块*i*与其他斑块的连通性^[18–19],以 dPC 值计算的 水文连通度可反映湿地斑块之间连通的概率^[18–19]。

2.4 遥感影像反演植被生物量及植被碳库计算

2.4.1 植被生物量测定

于 2022 年 7 月进行了湿地植被生物量样品采集和测定,保证了样品采集时间与遥感影像反演时间相一



Fig.2 Changes of IIC and PC values at different distance

IIC:整体连通性指数 Integral index of connectivity; PC:可能连通性指数 Probability of connectivity index

致。实地样点的选择遵循植被类型分布的均匀性和代表性以及交通可达性,共设置 30 个样点,每个样点设置 3 个重复样方,样方大小为1 m×1 m。样点分布如图1 所示。采集时,将样方内植物地上部分沿地面贴根部剪 下,共采集 90 个植物地上样品,并随机选择 5 个样方进行地下生物量采集,用于计算地下/地上的比值。植物 样品带回实验室,放入 65℃ 的恒温烘箱中烘干 72 h 至恒重后称重,所得重量即为植被地上生物量。 2.4.2 遥感影像反演植被生物量数据验证

选取常用的 8 种植被指数 NDVI、RVI、SAVI、MSAVI、DVI、EVI、GNDVI 进行计算,用实测生物量与 8 种植 被指数进行相关性分析,其中 NDVI 与 SAVI 两种指数与生物量存在显著的正相关关系(表 1)。

NDVI 与 SAVI 的指数计算结果如图 3 所示。采用同纬度地带已有的 SAVI 指数生物量回归模型与和 NDVI 指数生物量回归模型^[30-31](表 2)对科克苏湿地地上生物量进行反演,并根据实测样本对反演结果进行 验证,利用均方根误差(RMSE)和决定系数(*R*²)判定植被生物量反演模型的精度,计算公式如下^[32]:

RMSE =
$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - y'_i)^2}$$

 $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y'_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i-}\bar{y})^2}$

式中,n为样本数量,y_i和 y_i'分别为实测植被生物量和遥感反演的植被生物量,y'为实测植被生物量的平均值。

拟合结果如图 4 所示, SAVI 指数构建的模型和 NDVI 指数模型精度都较高(R²>0.91),但 SAVI 模型拟合 线与 1:1 线差距较小,因此选用 SAVI 指数构建的生物量模型对整个研究区的植被地上生物量进行反演。

Table 1 Calculation formula	s of vegetation indices and correlation analysis of biomass	
植被指数	计算公式	相关性
Vegetation index	Calculation formula	Correlation
归一化植被指数 NDVI ^[23]	$\rho_{\rm NIR} - \rho_{\rm RED}$	0.924 **
Normalizaed Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	
修正土壤调整植被指数 MSAVI ^[24]	MSAVI= $\frac{2\rho_{\text{NIR}}+1-\sqrt{(2\rho_{\text{NIR}}+1)^2-8\rho_{\text{NIR}}-\rho_{\text{RED}}}}{2}$	0.915 **
Modified Soil Adjusted Vegetation Index		
增强型植被指数 EVI ^[25]	$2.5(\rho_{\rm NIR}-\rho_{\rm RED})$	0.054**
Enhanced Vegetation Index	$EV1 = \frac{\rho_{\text{NIR}} + 6\rho_{\text{RED}} - 7.5\rho_{\text{BLUE}} + 1}{\rho_{\text{NIR}} + 6\rho_{\text{RED}} - 7.5\rho_{\text{BLUE}} + 1}$	0.854
差值植被指数 DVI ^[26]	DVI-a -a	0.785 **
Difference Vegetation Index	$D VI = \rho_{\rm NIR} \rho_{\rm RED}$	
比值植被指数 RVI ^[27]	$\rho_{\rm NIR}$	0 000 **
Ratio Vegetation Index	$\frac{1}{\rho_{\text{RED}}}$	0.898
土壤调整植被指数 SAVI ^[28]	$SAVI = \frac{(\rho_{\text{NR}} - \rho_{\text{RED}}) (1+L)}{(1+L)}$	0.024 **
Soil-Adjusted Vegetation Index	$SAVI-(\rho_{\rm NIR}+\rho_{\rm RED}+L)$	0.924
绿光归一化差值植被指数 GNDVI ^[29]	$CNDVI - \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{GREEN}}}{\rho_{\text{GREEN}}}$	0 872 **
Green Normalized Difference Vegetation Index	$G_{\rm IND} v_{\rm I} = \frac{1}{\rho_{\rm NIR} + \rho_{\rm GREEN}}$	0.072

表1 植被指数计算公式及生物量相关性分析

** 表示在 P< 0.01 级别相关性显著

表 2 两种植被指数反演模型

Table 2 The models of the vegetation index		
植被指数 Vegetation index	反演模型 Inversion model	
归一化植被指数 NDVI	$y = 771.571x - 565.99x^2 + 2562.361x^3 + 55.952$	
土壤调整植被指数 SAVI	y = 1163.3x - 256.16	

2.4.3 植被总生物量及碳库估算

根据样点实地采集测定的植物平均根冠比估算植被总生物量[33]:

 $Biomass_i = AGB + BGB$

式中,AGB 为植被地上生物量,BGB 为植被地下生物量,由 AGB 除以植物平均根冠比获得。 湿地植被碳库采用国际上常用的植被总生物量乘以碳转化系数估算^[34]:

 $C_i = \text{Biomass}_i \times v_i$

式中 C_i 为湿地植被碳库,Biomass_i为植被总生物量, v_i 为植被碳转化系数,取值 $0.41^{[35]}$ 。



图 3 NDVI 与 SAVI 植被指数 Fig.3 NDVI and SAVI vegetation index

NDVI:归一化植被指数 Normalizaed difference vegetation index; SAVI:土壤调整植被指数 Soil-adjusted vegetation index

3 结果与分析

3.1 科克苏湿地水体斑块分布

科克苏湿地斑块分布有明显的季节性特征(图5)。6月的湿地水体斑块面积较大,占保护区面积的

3043





63.12%,除了北部和东南部外,大多数区域处于淹水状态;7月初水体大幅退去,小面积水体斑块零散分布在整个保护区中;7月末水体斑块持续减少,北部的阔克苏村、蒙古湾及保护区的核心区依旧分布着水体斑块,其它区域大多无水体斑块分布;8月水体斑块面积仅占研究区面积的6.27%,只有主河道和北部的阔克苏村和蒙古湾依旧处于淹水状态。



Fig.5 Distribution of surface water bodies in different months in Kekesu wetland

3.2 科克苏湿地植被生物量时空分布

科克苏湿地植被生物量具有明显的时空变化特征(图6)。6月植被生物量较高的区域分布在东北部的 阔克苏农场,地上生物量平均值为226 g/m²,总生物量平均值为809 g/m²。7月初植被生物量较高区域分布 在西部的阿克铁热克村及东部的巴勒喀木斯村,地上生物量平均值为915 g/m²,总生物量平均值为 3275 g/m²。7月末植被生物量较高区域主要分布在西部及南部的阿勒特拜,地上生物量平均值为836 g/m², 总生物量平均值为2991 g/m²。8月植被生物量较高区域分布在东北部,地上生物量平均值为598 g/m²,总生 物量平均值为2142 g/m²。

7月地上生物量达到生长季最高值,该时段科克苏湿地的植被总生物量为1.09×10⁹ kg,最大总生物量为4832 g/m²。



图 6 科克苏湿地不同月份植被地上生物量空间分布 Fig.6 Spatial distribution of aboveground biomass in different months in Kekesu wetland

3.3 科克苏湿地植被地上生物量及植被碳库与水文连通的关系

科克苏湿地植被地上生物量与水文连通度呈现非线性关系(图7)。水文连通度0—0.6 范围内,植被地 上生物量随水文连通度增加而增加;水文连通度0.6—1 范围内,植被地上生物量随水文连通度增加而降低, 植被地上生物量在水文连通度0.6 左右达到最大。

科克苏湿地植被碳库较高的区域分布在额尔齐斯河道及克兰河河道两侧的湿地区域以及保护区东部部 分区域,北部及东南部部分区域植被碳库较低(图8)。保护区内植被总碳库为4.5×10¹¹ kg C。科克苏湿地植 被碳库与水文连通呈现非线性关系,与地上生物量和水文连通关系类似,在水文连通度0.6 左右,植被碳库达 到最大,在1197—1406 g C/m²之间。

4 讨论

7期

4.1 科克苏湿地植被地上生物量

科克苏湿地植被生物量随季节变化呈现先增加后减少的趋势。5—6月是科克苏湿地降水量和径流量较大的2个月^[36],6月初上游拦河闸放水,科克苏湿地进入淹水状态,此时大部分植物处于生长初期,其生长会受到淹水限制。7月气温升高,湿地水分迅速蒸发,导致湿地水体斑块面积显著减少,受水涝影响的植物快速 生长^[37],植被地上生物量逐渐增加,达到0—1350 g/m²,这与神祥金等^[38]对中国草本沼泽反演的植被地上生物量密度范围—致。湿地水分的持续蒸散发使得8月份只有主河道依旧处于淹水状态,大部分地区不再积水,此时科克苏湿地会进行刈割,为牲畜提供草料,因此植被地上生物量下降。

科克苏湿地植被生物量呈现聚集分布的空间分布模式。额尔齐斯河及克兰河河道两侧的湿地和东部的

44 卷





Fig.7 The relationships between hydrological connectivity and aboveground biomass in Kekesu wetland



图 8 科克苏湿地植被碳库分布及水文连通与植被碳库的关系 Fig.8 Distribution of plant carbon pool and relationship between hydrological connectivity and plant carbon pool in Kekesu wetland

阔克苏农场为高生物量区域;北部阿热勒齐及阔克苏村和东南部萨尔胡松乡为低生物量区域。这一空间分布 格局的形成,很大程度上是湿地植被对生境条件长期适应尤其是对水文条件适应的结果。高生物量区域的水 体斑块分布较多,水分较为充足,多为水生及湿生植被,如芦苇(Phragmites australis)、两栖蓼(Persicaria amphibia)、水蓼(Persicaria hydropiper)、水葱(Schoenoplectus tabernaemontani)、荸荠(Eleocharis dulcis)、花蔺 (Butomus umbellatus)等,盖度大,生物量高。低生物量区域水体斑块较少,水分相对匮乏,植被类型多为碱蓬 (Suaeda glauca)、盐生车前(Plantago salsa)、小獐毛(Aeluropus pungens)、苍耳(Xanthium strumarium)、拔碱草 (Elymus dahuricus)、车轴草(Galium odoratum)等,生物量相对较低。

4.2 水文连通对科克苏湿地植被地上生物量及植被碳库的影响

水文连通与植被生物量的关系表明,湿地水文连通度对植被生物量及植被碳储存功能具有显著影响。我 们发现,科克苏湿地植被地上生物量和植被碳库随着水文连通度呈现先增加后减小的趋势,在水文连通度 0.6 左右时,植物生物量和植被碳库达到最高。研究表明,水文连通可以通过影响植被群落结构与分布格局,改变 植被地上生物量^[4,39],且适宜的水文连通可在时间和空间尺度上有效促进碳储存^[40],其能加强植物的光合作 用,促进光合产物向地上或地下部分分配,从而碳库增加。同时,适宜的水文连通能加强物质和能量循环,有 利于植物生长。水文连通度过高时,水动力的加强不利于植物幼苗萌发以及生长^[41];同时水位超过大多数植 物的耐受范围,植物受缺氧胁迫,光合作用能力下降;过多的水分还会导致土壤中有害细菌和真菌过度繁殖, 引起根腐病,严重的情况下会导致植物死亡^[42]。科克苏湿地水文连通度 0.6 左右时植被地上生物量及植被 碳库最高,这与 Wang 等^[41]的研究中幼苗移植策略的水文连通对植被影响的结果一致;Zhang^[43]等的研究中 水文连通与植被的关系也呈现抛物线关系,但水文连通度在 0.4 左右时,植被覆盖度达到峰值,这可能是因为 研究区地理位置的不同以及植被类型的不同而导致的差异。因此,在科克苏湿地水文调控时,可考虑维持适 宜的水文连通度范围,维持适宜的水位或土壤水分条件,从而促进植被生物量积累和碳储存功能提升,维持湿 地生态系统的稳定性。

5 结论

(1)科克苏湿地斑块分布有明显的时空特征。6月的湿地水体斑块面积最大,占研究区面积的63.12%, 大多数区域处于淹水状态;7月湿地水体斑块面积持续减小,呈零散分布在整个保护区中;8月水体斑块面积 仅占研究区面积的6.27%,只有主河道和北部的阔克苏村和蒙古湾依旧处于淹水状态。

(2)科克苏湿地植被生物量呈现聚集分布的空间分布模式。额尔齐斯河及克兰河河道两侧的湿地和东部的阔克苏农场为高生物量区域,北部阿热勒齐及阔克苏村和东南部萨尔胡松乡为低生物量区域。7月生物量达到最高值,植被总生物量为1.09×10⁹ kg。8月受到刈割的影响,生物量降低。

(3)湿地水文连通度对植被生物量及植被碳储存功能具有显著影响。科克苏湿地水文连通与植被地上 生物量及植被碳库之间呈现抛物线关系,水文连通度 0.6 左右时植被地上生物量和植被碳库最大,有利于植 被碳固定,植被总碳库达到 4.5×10¹¹ kg C。本研究揭示了科克苏湿地植被生物量的时空分布特征,建立了科 克苏湿地水文连通度与植被地上生物量及植被碳库的量化关系,明确了适宜的水文连通度对植被生物量积累 存在促进作用,可为湿地水文连通调控和植被碳储存功能提升提供有效参考。

参考文献(References):

- [1] 吴桂平,叶春,刘元波. 鄱阳湖自然保护区湿地植被生物量空间分布规律. 生态学报, 2015, 35(2): 361-369.
- [2] Liu J K, Liu Y, Xie L M, Zhao S Q, Dai L, Zhang Z M. A threshold like effect on the interaction between hydrological connectivity and dominant plant population in tidal marsh wetlands. Land Degradation \& Development, 2021, 32: 2922-2935.
- [3] Pringle C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? Hydrological Processes, 2003, 17(13): 2685-2689.
- [4] 苟芳珍,赵成章,杨俊仓,任杰,马俊逸,李子琴.苏干湖湿地植被地上生物量空间格局及其对水盐的响应.生态学报,2021,41(19): 7774-7784.
- [5] 王欢,陈文波,何蕾,李海峰.鄱阳湖不同水文连通性子湖水生植被覆盖度对年际水位变化的响应.应用生态学报,2022,33(1): 191-200.
- [6] 冯璐, 刘京涛, 韩广轩, 张启浩, 彭玲. 黄河三角洲滨海湿地地下水位变化对土壤种子库特征的影响. 生态学报, 2021, 41(10): 3826-3835.
- [7] Means M M, Ahn C, Korol A R, Williams L D. Carbon storage potential by four macrophytes as affected by planting diversity in a created wetland. Journal of Environmental Management, 2016, 165: 133-139.
- [8] Reid M A, Reid M C, Thoms M C. Ecological significance of hydrological connectivity for wetland plant communities on a dryland floodplain river, MacIntyre River, Australia. Aquatic Sciences, 2016, 78(1): 139-158.
- [9] 崔保山,蔡燕子,谢湉,宁中华,华妍妍.湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势.北京师范大学学报:自然科学版,2016,52 (6):738-746.
- [10] 陈维社. 阿勒泰地区湿地及其保护. 新疆林业, 2013(4): 21-22.

- [11] 叶尔江. 阿勒泰市向科克苏湿地生态补水.伊犁日报(汉), 2009-06-22(002).
- [12] 阿依努·吐逊, 张青青, 徐海量, 闫俊杰. 基于 NDVI 科克苏湿地蒸散量时空变化特征分析. 西南农业学报, 2021, 34(3): 647-653.
- [13] 杨帆,林涛,徐海量,凌红波,刘星宏.新疆科克苏湿地草本植物群落分类及其与环境的关系.草业科学,2021,38(12):2340-2349.
- [14] 田润炜,蔡新斌,买尔燕古丽·阿不都热合曼,江晓珩,林宣龙,刘丽燕.新疆阿勒泰科克苏湿地自然保护区生态服务价值评价.湿地科学,2015,13(4):491-494.
- [15] 闫凯, 靳瑰丽, 刘伟, 阿德列提, 邓新疆, 再努然木・阿不都艾尼. 不同利用方式下新疆春秋牧场植物群落特征变化趋势. 草业科学, 2011, 28(7): 1339-1344.
- [16] Lefebvre G, Davranche A, Willm L, Campagna J, Redmond L, Merle C, Guelmami A, Poulin B. Introducing WIW for detecting the presence of water in wetlands with landsat and sentinel satellites. Remote Sens, 2019, 11: 2210.
- [17] Fisher A, Flood N, Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. Remote Sensing of Environment, 2016, 175: 167-182.
- [18] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. Landscape and Urban Planning, 2007, 83(2/3): 91-103.
- [19] Dou P, Xie T, Li S Z, Bai J H, Cui B S. A network perspective to evaluate hydrological connectivity effects on macroinvertebrate assemblages. Wetlands, 2020, 40(6): 2837-2848.
- [20] 杜志博,李洪远,孟伟庆.天津滨海新区湿地景观连接度距离阈值研究.生态学报,2019,39(17):6534-6544.
- [21] 冯久格,李谦维,梁晨,张晓雅,乐艺,高俊琴.基于景观指数的黄河口湿地水文连通动态分析.北京师范大学学报:自然科学版,2021, 57(1):12-21.
- [22] Liang J, He X Y, Zeng G M, Zhong M Z, Gao X, Li X, Li X D, Wu H P, Feng C T, Xing W L, Fang Y L, Mo D. Integrating priority areas and ecological corridors into national network for conservation planning in China. Science of the Total Environment, 2018, 626: 22-29.
- [23] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, Deering D W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA-CR-132982,1973.
- [24] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, Kerr Y H, Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, 1994, 48 (2): 119-126.
- [25] Huete A, Justice C, Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 224-234.
- [26] Richardson A, Wiegand C. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43.
- [27] Pearson R, Miller L D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado, 1972.
- [28] Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.
- [29] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 289-298.
- [30] 陈鹏飞, 王卷乐, 廖秀英, 尹芳, 陈宝瑞, 刘睿. 基于环境减灾卫星遥感数据的呼伦贝尔草地地上生物量反演研究. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1122-1131.
- [31] 周亚军,刘廷玺,段利民,王怡璇,李霞,黎明扬.锡林河上游流域河流湿地植物地上生物量遥感估算.湿地科学,2020,18(5): 589-596.
- [32] 王建步, 张杰, 马毅, 任广波. 基于 GF-1 WFV 的黄河口湿地植被碳储量估算研究. 海洋科学进展, 2019, 37(1): 75-83.
- [33] 马安娜,于贵瑞,何念鹏,王秋凤,彭舜磊.中国草地植被地上和地下生物量的关系分析.第四纪研究,2014,34(4):769-776.
- [34] 张婷婷, 石昊, 芦晓峰, 杨国范. 辽河口湿地自然植被碳储量研究. 人民黄河, 2020, 42(10): 92-95.
- [35] 刘耘华. 新疆草地固碳现状及其影响因素分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- [36] 杨卫东.关于阿勒泰地区河流水文的特征研究.能源与节能, 2017(12): 101-102, 142.
- [37] Jürgen K, Heinz R. Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. Plant, Cell & Environment, 2014, 37(10); 2245-59.
- [38] 神祥金,姜明,吕宪国,刘兴土,刘波,张佳琦,王宪伟,佟守正,雷光春,王升忠,仝川,范航清,田昆,王晓龙,胡远满,谢永宏,马 牧源,张树文,曹春香,王志臣.中国草本沼泽植被地上生物量及其空间分布格局.中国科学:地球科学,2021,51(8):1306-1316.
- [39] 骆梦, 王青, 邱冬冬, 施伟, 宁中华, 蔡燕子, 宋振峰, 崔保山. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2018, 54(1): 17-24.
- [40] Feng J G, Liang J F, Li Q W, Zhang X Y, Yue Y, Gao J Q. Effect of hydrological connectivity on soil carbon storage in the Yellow River Delta wetlands of China. Chinese Geographical Science, 2021, 31(2): 197-208.
- [41] Wang Q, Xie T, Luo M T, Bai J, Chen C, Ning Z, Cui B. How hydrological connectivity regulates the plant recovery process in salt marshes. Journal of Applied Ecology, 2021, 58(6): 1314-1324.
- [42] 朱义族,李雅颖,韩继刚,姚槐应.水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展.应用生态学报,2019,30(12): 4323-4332.
- [43] Zhang C, Kuai S Y, Tang C H, Zhang S H. Evaluation of hydrological connectivity in a river floodplain system and its influence on the vegetation coverage. Ecological Indicators, 2022, 144: 109445.