

DOI: 10.5846/stxb202102250528

汪正祥, 熊蔚, 邓龙强, 林丽群, 张志麒, 李亭亭. 大九湖沼泽湿地大泥炭藓种群分布特征及其制约因素. 生态学报, 2023, 43(6): 2388-2396.

Wang Z X, Xiong W, Deng L Q, Lin L Q, Zhang Z Q, Li T T. Distribution characteristics of *Sphagnum palustre* L. population and its influencing factors in *Sphagnum* wetland of Dajiu Lake. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2388-2396.

大九湖沼泽湿地大泥炭藓种群分布特征及其制约因素

汪正祥^{1,2}, 熊蔚^{1,2}, 邓龙强³, 林丽群^{1,2}, 张志麒³, 李亭亭^{1,2,*}

1 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 武汉 430062

2 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062

3 神农架国家公园管理局, 神农架 442421

摘要:为探究神农架大九湖泥炭藓湿地的关键物种大泥炭藓(*Sphagnum palustre* L.)种群的分布特征及其制约因素,于2020年8月沿垂直湖岸带方向设置样带和样方进行植被和环境因子的调查和采样,于室内进行各理化指标和生理指标的测定与分析。研究结果显示:(1)大泥炭藓三生长指标(头状枝数量、盖度、生物量)对垂直湖岸带距离的响应具有一致性,均随垂直湖岸带距离的增加呈现先增加后减小的趋势,在距湖岸40m左右时,大泥炭藓种群生产力最高;(2)多元线性回归分析结果显示,在20个环境因子(土壤含水量、容重、孔隙度、固相比、液相比、气相比、pH、TN、TP、TOC、AHN、AP、TOC/TN、TOC/TP、TN/TP;地下水埋深;水样pH、TN、TP、TN/TP)中,地下水埋深是影响大泥炭藓种群生长和分布的最重要环境因子,其次是土壤TOC/TP;在8个生理指标(组织TC、TN、TP、TC/TN、TC/TP、TN/TP、总叶绿素、类胡萝卜素)中,组织TC与大泥炭藓生长显著相关;(3)地下水埋深通过影响大泥炭藓头状枝的光合和呼吸作用,土壤TOC通过影响大泥炭藓吸收同化到自身组织中的TC含量,来影响其种群的生长和分布;(4)除了非生物因子,维管植物的种间作用等生物因子也影响着大泥炭藓种群的生长和分布。本研究可为亚热带山地泥炭藓湿地的保护和恢复提供理论依据和科学指导。

关键词:大泥炭藓; 分布特征; 环境因子; 泥炭藓湿地; 神农架国家公园

Distribution characteristics of *Sphagnum palustre* L. population and its influencing factors in *Sphagnum* wetland of Dajiu Lake

WANG Zhengxiang^{1,2}, XIONG Wei^{1,2}, DENG Longqiang³, LIN Liqun^{1,2}, ZHANG Zhiqi³, LI Tingting^{1,2,*}

1 Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, Wuhan 430062, China

2 Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China

3 National Park Management Bureau of Shennongjia, Shennongjia 442421, China

Abstract: *Sphagnum* species, as the peatland ecosystem engineer, play a key role in both succession of plant communities and development of ecological functions in *Sphagnum* wetlands. In order to explore the distribution characteristics and its influencing factors of the key species — *Sphagnum palustre* L. population in *Sphagnum* wetland of Dajiu Lake, Shennongjia, we carried out the field investigation and sampling for both vegetation and environmental factors in August 2020, by setting belt transects and quadrats along the outward direction perpendicular to lakeshore. A total of 33 quadrats including 11 types of plant communities were investigated and the corresponding soil and pore water samples were collected, then a series of physical and chemical indicators and physiological indicators were determined and analyzed in the laboratory. Combined curvilinear regression analysis, multiple linear regression analysis with Pearson correlation analysis, our results showed

基金项目:国家自然科学基金项目(42101065); 湖北省中央引导地方科技发展专项(2019ZYD050); 神农架金丝猴保育生物学湖北省重点实验室开放基金项目(SNJGKL202101)

收稿日期:2021-02-25; **网络出版日期:**2022-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Lt0819@hubei.edu.cn

that: (1) with the increasing vertical distance away from lakeshore, each of the three growth indicators (number of capitula, coverage, and biomass) of *S. palustre* showed the increased trend at first and then decreased, with the largest productivity of *S. palustre* population occurred at about 40 m away from the lakeshore vertically. (2) The multiple linear regression analysis showed that among the twenty environmental factors, water table depth was the most important one affecting growth and distribution characteristics of *S. palustre* population, followed by the soil ratio of total organic carbon content to total phosphorus content (TOC/TP). Among the eight physiological indicators [the tissue total carbon content (TC), the tissue total nitrogen content (TN), the tissue total phosphorus content (TP), the tissue ratio of total carbon content to total nitrogen content (TC/TN), the tissue ratio of total carbon content to total phosphorus content (TC/TP), the tissue ratio of total nitrogen content to total phosphorus content (TN/TP), total chlorophyll content, and carotenoids content], only tissue TC significantly affected *S. palustre* growth and thus its population distribution characteristics. (3) Water table depth affected photosynthesis and respiration of *S. palustre* capitula, and soil total organic carbon content (TOC) affected C absorption and C assimilation in *S. palustre* tissue, which further affected its population growth and distribution characteristics. (4) In addition to abiotic factors, the biotic factors such as the interspecific interaction of vascular plants also played the important roles in the growth and distribution characteristics of *S. palustre* population. Compared with *Veratrum nigrum*, which had dense lamina at its basal section of stem and thus larger shading coefficient, the sedge plant *Eriophorum comosum*, at coverage of 60%, was more favorable for *S. palustre*. This study provides scientific guidance for *Sphagnum* wetlands protection and restoration in the subtropical mountain regions.

Key Words: *Sphagnum palustre* L.; distribution characteristics; environmental factors; *Sphagnum* wetland; Shennongjia National Park

泥炭地总面积仅相当于陆地面积的 3%,但其碳储量约为全球土壤碳储量的三分之一,是最大的陆地土壤碳汇^[1-2]。而泥炭藓属物种是泥炭地中重要的造碳植物^[3]。泥炭藓湿地是以泥炭藓属植物占优势的沼泽湿地,其在固碳^[4]、维持生物多样性^[5]、净化污染物^[6-7]等方面具有重要的生态价值,而且泥炭藓湿地通常发育于江河源头地区^[8-10],具有涵养水源、水文调节功能^[11-12],因此对泥炭藓湿地进行保护和研究尤为重要。

种群的内分布格局指其个体在生活空间的相对位置,包括均匀型、随机型、集群型^[13-14]。泥炭沼泽中泥炭藓种群在不同群落内呈现明显的聚集型分布^[15]。大量研究表明,泥炭沼泽的种群分布格局与四个主要梯度有关:地下水埋深梯度、养分有效性梯度、酸碱度梯度、沼泽边缘—沼泽扩展梯度^[16-18]。当地下水埋深、养分、酸碱度任一梯度具有明显变化时,物种种群分布也具有明显变化^[17,19]。而关于沼泽边缘—沼泽扩展梯度,有学者认为其背后的生态原因没有明确界定,具有复杂性,并且因地而异^[16,20]。

大九湖泥炭藓湿地是华中地区保存最完好的亚热带亚高山泥炭沼泽湿地^[21]。大九湖湿地包含九个人工湖泊,由南向北依次排开,并由沟渠串联在一起^[22],靠近其中几个湖泊边缘处存在若干发育良好的泥炭藓沼泽湿地斑块。前期我们在大九湖泥炭藓湿地植被调查中发现,沿垂直湖岸带向外距离的增加,维管植物群落类型由草本群落(苔草群落→藜芦群落)到灌木群落(绣线菊群落)发生明显变化。与此同时,大九湖泥炭藓湿地关键物种—大泥炭藓(*Sphagnum palustre* L.)种群的生长和分布也发生着变化,这可能会进一步影响到湿地的演替以及湿地生态功能的发挥,这也显示对大泥炭藓种群分布特征及其制约因素进行研究具有重要意义。早期,Green 研究了毛壁泥炭藓(*Sphagnum imbricatum*)种群的空间分布特征^[20]。就国内而言,仅陈旭对长白山哈尼泥炭地多种苔藓植物分布与环境因子的关系进行研究^[23],并未涉及大泥炭藓,而该研究区域的自然环境及植物群落类型与亚热带区域差异也较大。本文以亚热带山地大九湖泥炭藓湿地为研究区域,通过设置样带和样方进行植被和环境因子的调查、取样和测定分析,探讨大泥炭藓(*S. palustre*)种群的分布特征及其制约因素,为亚热带山地泥炭藓湿地的保护和恢复提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

神农架大九湖湿地发育于大巴山东段的岩溶盆地之中,海拔 1730—1800m,年均温 7.4℃,全年日照 1000h 左右,年降水丰富,可达 1528mm,相对湿度大于 80%^[21]。泥炭藓沼泽是大九湖湿地的重要组成部分,本文以二号湖(31°28'N, 110°01'E, 海拔 1759m)西南侧泥炭藓沼泽为研究区,前期调查显示,该区域植物群落的分布和生长状况沿垂直湖岸带方向具有明显的变化规律,即从湖边向外依次为:拂子茅-大泥炭藓群丛(Ass. *Calamagrostis epigeios*-*Sphagnum palustre*)、丝叶苔草-大泥炭藓群丛(Ass. *Carex capilliformis*-*Sphagnum palustre*)、湖北大戟+丝叶苔草-大泥炭藓群丛(Ass. *Euphorbia hylonoma*+*Carex capilliformis*-*Sphagnum palustre*)、分株紫萁-大泥炭藓群丛(Ass. *Osmunda cinnamomea*-*Sphagnum palustre*)、丛毛羊胡子草-大泥炭藓群丛(Ass. *Eriophorum comosum*-*Sphagnum palustre*)、藜芦-大泥炭藓群丛(Ass. *Veratrum nigrum*-*Sphagnum palustre*)、拂子茅+地榆-大泥炭藓群丛(Ass. *Calamagrostis epigeios*+*Sanguisorba officinalis*-*Sphagnum palustre*)、地榆+丝叶苔草-大泥炭藓群丛(Ass. *Sanguisorba officinalis*+*Carex capilliformis*-*Sphagnum palustre*)、红穗苔草+地榆-大泥炭藓群丛(Ass. *Carex argyi*+*Sanguisorba officinalis*-*Sphagnum palustre*)、地榆+丝叶苔草群丛(Ass. *Sanguisorba officinalis*+*Carex capilliformis*)、绣线菊-地榆群丛(Ass. *Spiraea salicifolia*-*Sanguisorba officinalis*)。

1.2 实验方法

1.2.1 野外调查与样品采集

2020 年 8 月,在对大九湖泥炭藓湿地植被进行野外调查的基础上,于二号湖西南侧泥炭藓沼泽区选取调查样地(见图 1)。根据群落外貌特征,在样地内沿垂直于湖岸带方向设置 3 条 5m 宽样带,在样带内依据优势种选取 11 种植物群丛类型,每类型设置 3 个 1m×1m 调查样方(编号:1—33 号)。用手持 GPS 定位仪(UniStrong MG711 北京)测量样方中心点到湖岸线的垂直距离。记录每一样方内出现的所有植物种类及每种植物的株数、株高、盖度等;此外,选取样方内代表性区域放置 10cm×10cm 的采样框,统计框内的大泥炭藓头状枝数量,随后采集框内全部大泥炭藓植株装于塑封袋密封。共采集泥炭藓样品 27 份(26—31 号样方未生长大泥炭藓)。在调查植物的同时,每个 1m×1m 样方使用穿孔 PVC 管法^[24]测量地下水埋深,使用针管吸取法采集水样^[25];用环刀法采集土样,在上述 10cm×10cm 采样框内完成全部大泥炭藓植株采集并去除其他维管植物后,使用环刀采集框内表层土壤。将所有样品带回实验室,进行相关指标测定。

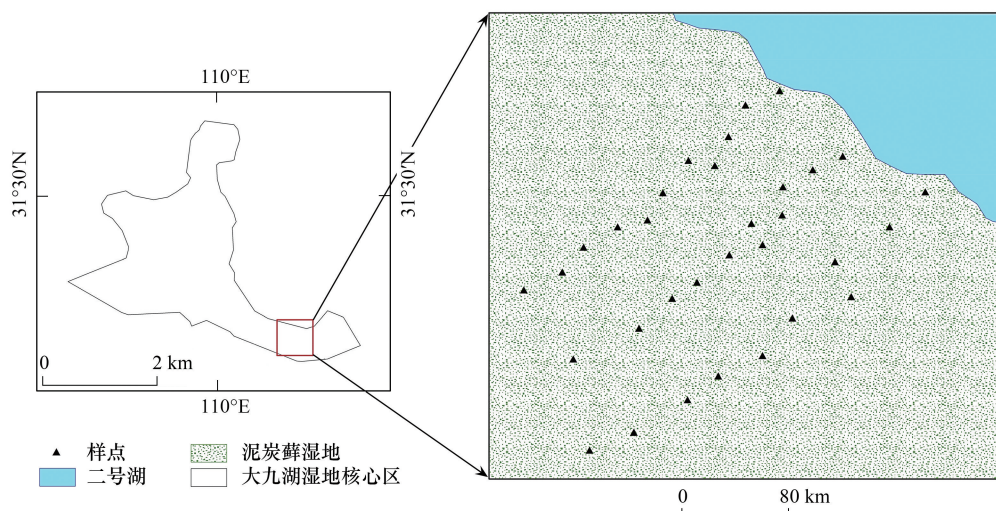


图 1 研究区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area

1.2.2 指标测定

大泥炭藓鲜重于采集后 2h 内测定,随后室内阴干再 70℃ 恒温烘干 48h,测其干重。分别将土样和大泥炭藓头状枝干燥后研磨过 100 目筛,随后进行各理化指标测定。土样测定指标包括含水量、容重、孔隙度、固相比、液相比、气相比、pH、总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)、碱解氮(AHN)、有效磷(AP);大泥炭藓测定指标包括总氮、总磷、总碳(TC)、总叶绿素(a+b)、类胡萝卜素;水样测定指标包括 pH、总氮、总磷。具体测定方法见表 1。

表 1 样品理化指标的测定方法
Table 1 Measurement methods of physical and chemical indicators in both soil and water samples

测定指标 Measurement indicators	测定方法及仪器型号 Measurement method and instrument model
土样、水样 pH Soil pH and water pH	pH 电位计测定(pHS-3E 型,上海)
土样 TN Soil TN	酸溶(H ₂ SO ₄ -HClO ₄)-靛酚蓝比色法
土样、藓样 TP Soil TP and capitula TP in <i>S. palustre</i>	酸溶(H ₂ SO ₄ -HClO ₄)-钼锑抗吸光法
土样 TOC Soil TOC	重铬酸钾容量法-外加热法
土样 AHN Soil AHN	碱解扩散法
土样 AP Soil AP	0.5mol/L NaHCO ₃ 浸提法
水样 TN、TP Water TN and TP	碱性过硫酸钾消解法
藓样 TC、TN Capitula TC and TN in <i>S. palustre</i>	Elementar 元素分析仪(vario MACRO CUBE,Germany)
藓样总叶绿素、类胡萝卜素 Total chlorophyll and carotenoids in capitula of <i>S. palustre</i>	乙醇浸提法-分光光度法

TN: 总氮 Total nitrogen content; TP: 总磷 Total phosphorus content; TOC: 总有机碳 Total organic carbon content; AHN: 碱解氮

1.2.3 数据分析

采用多种回归模型检验垂直湖岸带距离与各环境因子(土壤含水量、容重、孔隙度、固相比、液相比、气相比、pH、TN、TP、TOC、AHN、AP、TOC/TN、TOC/TP、TN/TP、地下水埋深、沼泽水的 pH、TN、TP、TN/TP)、各生理因子(大泥炭藓 TN、TP、TC、TC/TN、TC/TP、TN/TP、总叶绿素、类胡萝卜素)及大泥炭藓三生长指标(头状枝数量、盖度、生物量)之间的相关性,并筛选出最优模型进行分析。使用多重线性逐步回归分析分别检验影响大泥炭藓生长的主导环境因子和生理指标;随后使用 Pearson 相关性分析检验环境因子与植物生理指标的相关性。所有数据分析使用软件 SPSS 20.0 和 Excel 2010 完成;图形制作使用软件 Excel 2010 完成。

2 结果与分析

2.1 环境因子对距离的响应

回归分析表明除土壤 TP、AP、地下水 TN/TP 与距离无显著相关性外,其余环境因子与距离均显著相关(图 2)。其中,气相比沿垂直湖岸带距离的增加持续增加;土壤容重、固相比、pH、TOC/TN 沿距离呈倒单峰模式,最小值出现在距湖岸 60m 左右;土壤含水量、孔隙度、液相比、TN、TOC、AHN、TOC/TP、TN/TP、地下水埋深、地下水 pH、TN、TP 沿距离呈单峰模式,其中土壤液相比在距离 40m 左右出现最大值,土壤含水量、孔隙度、TN、TOC、AHN、TOC/TP、TN/TP 及地下水 pH 在距湖岸 60m 左右出现最大值,地下水 TN、TP 在距湖岸 80m 左右出现最大值。

2.2 大泥炭藓生理指标对距离的响应

回归分析表明,除大泥炭藓 TN、TC/TN、总叶绿素、类胡萝卜素与距离无显著相关性外,其余生理指标与距离均显著相关(图 3)。其中,TC、TC/TP、TN/TP 沿距离呈单峰模式,最大值出现在距湖岸 60m 左右;TP 沿距离呈倒单峰模式,最小值出现在距湖岸 60m 左右。

2.3 大泥炭藓生长对距离的响应

回归分析结果表明大泥炭藓三生长指标(头状枝数、盖度、生物量)对距离的响应具有一致性,随着垂直

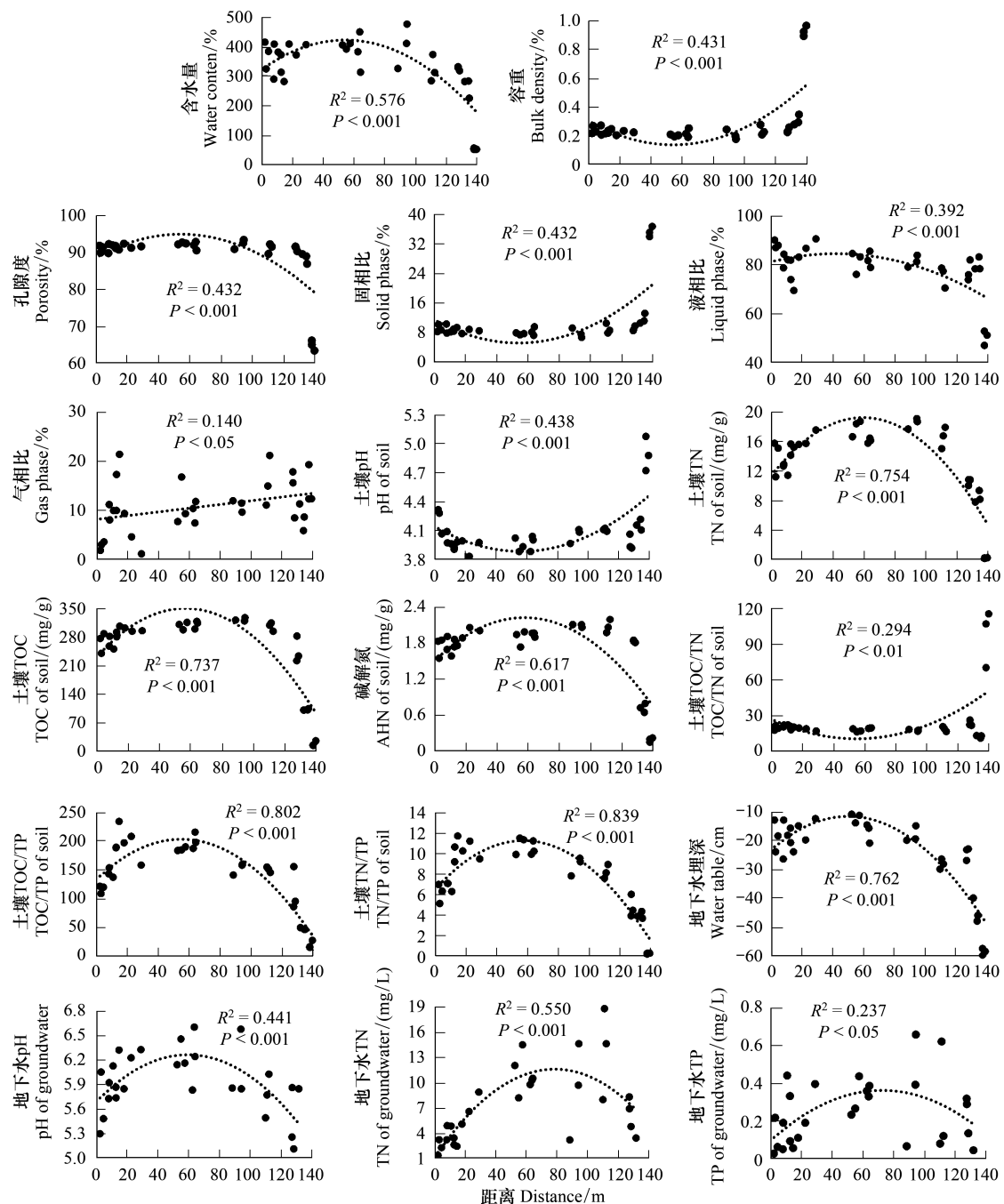


图2 各环境因子与垂直湖岸带距离的回归分析

Fig.2 Regression analysis between each environmental factor and vertical distance from lakeshore

湖岸带距离的增加均呈现先增加后减小的趋势(图4),且最大值都出现在距湖岸40m左右。

2.4 环境因子对大泥炭藓生长的影响

多重线性逐步回归分析表明,在20个环境因子(土壤含水量、容重、孔隙度、固相比、液相比、气相比、pH、TN、TP、TOC、AHN、AP、TOC/TN、TOC/TP、TN/TP;地下水埋深;水样pH、TN、TP、TN/TP)中,仅地下水埋深(X_1)对生物量(Y)影响显著,且二者正相关(表2),说明地下水埋深是影响大泥炭藓生长最主要的环境因子。回归方程如下:

$$Y = 0.237X_1 + 13.030 \quad (R^2 = 0.269, P < 0.01)$$

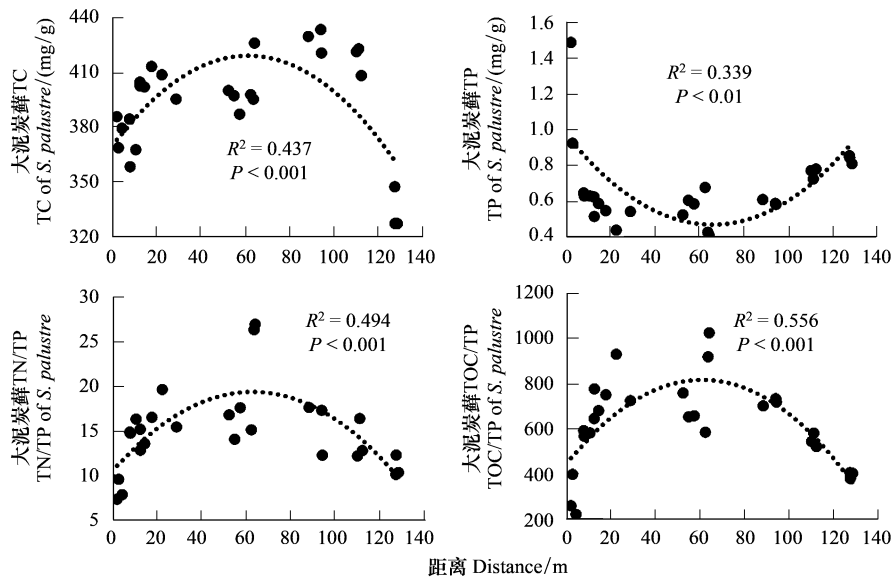


图3 大泥炭藓各生理指标与垂直湖岸带距离的回归分析

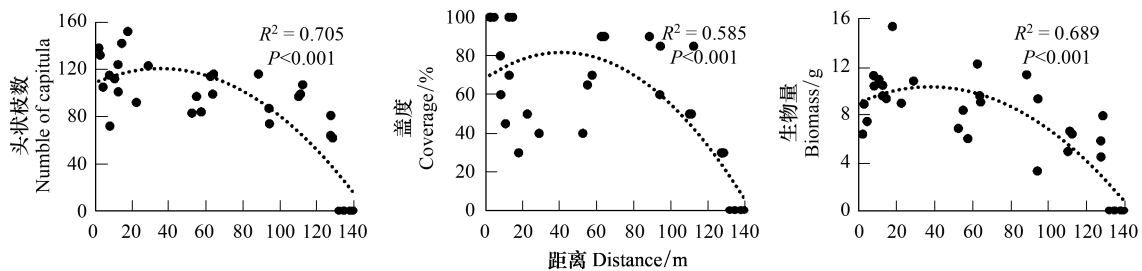
Fig.3 Regression analysis between each physiological indicator of *S. palustre* and vertical distance from lakeshore

图4 大泥炭藓三生长指标与垂直湖岸带距离的回归分析

Fig.4 Regression analysis between each of three growth indicators of *S. palustre* and vertical distance from lakeshore

基于上述分析,在去除地下水埋深后对剩下 19 个环境因子进行与生物量的多元线性逐步回归分析,发现土壤 TOC/TP(X_2)对生物量(Y)影响显著。回归方程如下:

$$Y = 0.035X_2 + 2.69 \quad (R^2 = 0.233, P < 0.01)$$

因此,对大泥炭藓生长影响最大的环境因子是地下水埋深,其次是土壤 TOC/TP。

2.5 大泥炭藓生理指标对其生长的影响

多重线性逐步回归分析表明,在大泥炭藓的 8 个生理指标(TN、TC、TP、TC/TN、TC/TP、TN/TP、总叶绿素、类胡萝卜素)中,仅 TC(X)对生物量(Y)影响显著,且二者正相关。回归方程如下:

$$Y = 0.05X - 11.215 \quad (R^2 = 0.218, P < 0.05)$$

2.6 主导环境因子与生理指标的相关性分析

基于上述环境因子、生理指标对大泥炭藓生物量影响的分析,进一步对土壤 TOC/TP、土壤 TOC 与大泥炭藓组织 TC 进行 Pearson 相关分析(表 2)。结果显示,土壤 TOC($r = 0.763, P < 0.01$)、土壤 TOC/TP($r = 0.501, P < 0.01$)与大泥炭藓组织 TC 呈极显著正相关。

表 2 主导环境因子与生理因子的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient between dominant environmental factors and physiological factors

	大泥炭藓 TC TC in <i>S. palustre</i>	土壤 TOC TOC in soil	土壤 TOC/TP TOC/TP in soil
大泥炭藓 TC TC in <i>S. palustre</i>	1		
土壤 TOC TOC in soil	0.763 **	1	
土壤 TOC/TP TOC/TP in soil	0.501 **	0.902 **	1

* * 分别表示在 0.01 水平上显著相关

3 讨论

本研究以头状枝数量、盖度和生物量三指标反映大泥炭藓的生长情况,并以生物量代表大泥炭藓的最终生产力。多重线性回归分析表明,地下水埋深是影响大泥炭藓生长最主要的环境因子,而地下水埋深随着垂直湖岸带距离的增加先增加后降低(图 2)。因此,研究区域大泥炭藓生长随着远离湖岸带方向先增加后降低可能是地下水埋深的相应变化导致的结果。前人大量研究表明,地下水埋深是影响泥炭藓生长的最重要环境因子^[24,26–27],并且在一定范围内地下水埋深与生物量显著正相关^[28]。本文也证实了上述结论,在-60—-10cm 范围内,两者显著正相关,大泥炭藓生物量随地下水埋深的降低持续减小($Y=0.237X_1+13.030$);并且在地下水埋深低于-40cm 时不再生长大泥炭藓,这与部分学者的研究结果一致^[29–30]。由于泥炭藓缺乏真正的根和内部导水组织^[26],对被动水分运输的依赖使其对水分变化十分敏感^[27]。当地下水埋深较低时将阻碍毛细水向泥炭藓头状枝(光合作用最活跃)部分的运输,进一步影响泥炭藓的光合作用和呼吸作用^[31],最终导致生产力的降低^[28]。

本研究中,地下水埋深沿垂直湖岸带距离增加呈先增高后降低趋势,这可能是受到湿地内微地形影响。在距湖岸 60m 出现最高地下水埋深-10cm(图 2),此时大泥炭藓也生长的最好(图 4),这与 Tuittila 等^[31]和李亭亭等^[24]研究发现 0—10cm 左右为大泥炭藓生长的最佳水位条件的结论相一致。

除地下水埋深外,土壤 TOC/TP 是影响大泥炭藓生物量的第二重要环境因子($Y=0.035X_2+2.69$)。经分析发现土壤 TOC、大泥炭藓组织 TC 以及大泥炭藓生物量三者之间均显著正相关,但土壤 TP、组织 TP 与生物量之间均无显著相关性($P>0.05$)。这可能表明:主要是土壤中的有机碳能够被大泥炭藓吸收同化到自身组织,进而对其生长产生影响。因此,从这个角度,也可能是随着垂直湖岸带距离的增加带来的土壤 TOC 先增加后降低的变化(图 2)导致大泥炭藓的生长沿着此方向呈现出先增加后降低的趋势(图 4)。本研究中,大泥炭藓随着组织 TC 含量(327.57—429.67mg/g 范围内)的增加生长的更好($Y=0.05X-11.215$),显示了 C 对大泥炭藓的积极作用。这种积极作用在其他泥炭藓物种的研究中已经被发现;Smolders^[32]发现组织中的 C 能使泥炭藓产生坚硬、直立的茎干,促使其垂直向上生长,进一步形成了密集紧凑的聚合体,这种策略创造了有利于自身生长的微环境,以此来避免减小与其他物种进行竞争。另一方面,泥炭藓组织中以 C 为主的碳水化合物能够赋予细胞壁更大的持水能力和强度^[33],且过量的 C 会转化为萜类、单宁等化合物,这类化合物使泥炭藓能够更好地抵御食草动物和病原体^[33],均有利于泥炭藓自身的生长。

尽管地下水埋深、大泥炭藓 TC 和大泥炭藓生物量沿垂直湖岸带距离的变化均呈现较为一致的单峰趋势(图 2,图 3,图 4),但前两者与生物量的峰值却出现少许“错位”。地下水埋深与大泥炭藓 TC 峰值均出现在距湖岸 60m 左右(图 2,图 3),而大泥炭藓生物量峰值出现在距湖岸 40m 左右(图 4)。造成这种“错位”的原因可能有两方面:一是本研究中在距湖岸 40m 左右没有设置样方,距该处最近的样方设置在距湖岸 50m 左右,因此野外实际峰值与模型模拟的峰值存在少许误差;二是可能受到样地内维管植物的影响。本研究着重对非生物因子进行了分析,但生物因子(如植物的种间作用)对大泥炭藓的生长可能也起着不可忽视的作用。前人多项研究表明,一定条件下维管植物,尤其是莎草科植物,能够通过遮阴或提供结构支撑促进泥炭藓的生长^[34–35]。通常维管植物在盖度小于 60%左右时对泥炭藓产生有利影响^[35],当盖度过大时则会产生不利影

响。本研究中,在距湖岸 50m 左右处,样方优势种为莎草科植物丛毛羊胡子草(*Eriophorum comosum*),盖度约 60%;而在距湖岸 60m 左右处,样方优势种为藜芦(*Veratrum nigrum*),盖度约 65%。与莎草类植物不同,藜芦茎粗壮、叶大,幼时叶片在基部生长紧密,挤占泥炭藓的生存空间,而且遮光率较大,不利于泥炭藓生长。因此,可能是模型拟合产生的误差以及维管植物对大泥炭藓的种间作用共同导致了大泥炭藓在 40m(而非 60m)左右生长的最好,这需要今后进一步试验来验证。

大九湖湿地是北亚热带较为罕见的亚高山沼泽湿地,特别是其发育的泥炭藓沼泽是在较高海拔山地冷湿气候条件下形成。但大九湖湿地在历史上以排涝除渍为主的开发活动中修建起庞大的人工排水系统,在大九湖填湖造田、围泽植草的同时,也重创了大九湖的湿地生态系统。其直接的生态后果是原有的沼泽湿地植被特别是泥炭藓湿地植被退化,形成较大面积杂草类草甸以及较早化的金发藓藓丘。随着神农架国家公园的建设,大九湖泥炭藓湿地的保护和恢复也迫在眉睫。本研究表明,地下水埋深是影响大泥炭藓生长的至关重要的环境因子,而-10cm 左右的地下水埋深最有利于大泥炭藓种群的生长。该研究结果对重建大九湖湿地水文系统,恢复大九湖泥炭藓湿地沼泽生态系统具有重要指导意义。

4 结论

在前期调查发现大九湖泥炭藓湿地的植被沿垂直湖岸带方向呈现明显的带状分布现象的基础上,本研究进一步对大泥炭藓种群生长情况及环境因子进行调查采样,探究大泥炭藓种群生长及分布特征对垂直湖岸带距离的响应及其制约因素。结论如下:

(1)随着垂直湖岸带距离的增加,大泥炭藓种群生产力呈现出先增加后降低的趋势,在垂直湖岸带 40m 左右生长最好。

(2)地下水埋深和土壤 TOC 含量是影响大泥炭藓种群生长及分布特征的主要环境因子;地下水埋深通过影响头状枝光合和呼吸作用,土壤 TOC 通过影响大泥炭藓吸收同化到组织中的 TC,来影响其生长。在本研究范围内,地下水埋深、土壤 TOC、组织 TC 均对大泥炭藓生长产生促进作用。

(3)除了非生物因子,生物因子(例如维管植物的种间作用),也可能是影响泥炭藓种群生长及分布特征的重要因子。

参考文献(References):

- [1] Gorham E. Northern Peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 182-195.
- [2] Binet P, Rouifed S, Jassey V E J, Toussaint M L, Chiapusio G. Experimental climate warming alters the relationship between fungal root symbiosis and *Sphagnum* litter phenolics in two peatland microhabitats. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 153-161.
- [3] Clymo R S. *Sphagnum*-dominated peat bog: a naturally acid ecosystem. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1984, 305(1124): 487-499.
- [4] 庞毓雯,黄雨馨,俞立鹏,问静怡,吴玉环,徐俊锋. 基于 MODIS 数据的神农架大九湖泥炭藓沼泽植被指数变化研究. *生态学报*, 2019, 39(13): 4872-4882.
- [5] 卢建利,吴法清,郑炜. 湖北二仙岩亚高山泥炭藓沼泽湿地两栖爬行动物资源调查. *四川动物*, 2007, 26(2): 374-376.
- [6] 胡鸿兴,何伟,刘巧玲,胡万辉,沈虹,任晓迪,石宇鹏,杨阳,田艳萍,雷卫国,彭博,张五州,刘玲,钟鑫,陈侈,秦蓓蓓,张南南,毛娜,江丽,贾明元,沈娟,古南辉,陈文方. 大九湖泥炭藓湿地对磷、铜污染物净化作用的模拟研究. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(6): 920-926.
- [7] 胡鸿兴,张岩岩,何伟,田蓉,钟鑫,韩世松,李思思,王俊杰,陈文方,杨阳,陈侈,邓晗,文英,崔雅婷,李茜,王璇,彭菁菁,高鑫,唐义. 神农架大九湖泥炭藓沼泽湿地对镉(II)、铜(II)、铅(II)、锌(II)的净化模拟. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(11): 1050-1057.
- [8] 汪正祥,雷耘,刘胜祥,方元平,满金山,彭宗林,张柳,马广礼. 湖北七姊妹山自然保护区发现亚高山泥炭藓湿地. *华中师范大学学报:自然科学版*, 2005, 39(3): 387-388.
- [9] Li T T, Lei Y, Dai C, Yang L F, Li Z Q, Wang Z X. Effects of both substrate and nitrogen and phosphorus fertilizer on *Sphagnum palustre* growth in subtropical high-mountain regions and implications for peatland recovery. *Wetlands Ecology and Management*, 2018, 26(4): 651-663.

- [10] Li T T, Liu T, Lei Y, Li Z Q, Dai C, Wang Z X. Effects of the substrate and planting method on *Sphagnum palustre* growth in subtropical high-mountain regions and the underlying mechanisms. *Wetlands*, 2019, 39(4): 879-893.
- [11] Price J S, Edwards T W D, Yi Y, Whittington P N. Physical and isotopic characterization of evaporation from *Sphagnum* moss. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1/2): 175-182.
- [12] 黄咸雨, 张志麒, 王红梅, 陈旭, 朱宗敏, 顾延生, 秦养民, 刘金铃, 汪迎春. 神农架大九湖泥炭湿地关键带监测进展. *地球科学*, 2017, 42(6): 1026-1038.
- [13] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [14] 伊力塔, 韩海荣, 程小琴, 康峰峰, 张志杰. 灵空山林区辽东栎(*Quercus liaotungensis*)种群空间分布格局. *生态学报*, 2008, 28(7): 3254-3261.
- [15] 卜兆君. 东北贫营养泥炭沼泽几种植物的种群生态学研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2004.
- [16] Pellerin S, Lagneau L A, Lavoie M, Larocque M. Environmental factors explaining the vegetation patterns in a temperate peatland. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, 332(8): 720-731.
- [17] Jeglum J K, He F L. Pattern and vegetation-environment relationships in a boreal forested wetland in northeastern Ontario. *Canadian Journal of Botany*, 1995, 73(4): 629-637.
- [18] Marini L, Nascimbene J, Scotton M, Klimek S. Hydrochemistry, water table depth and related distribution patterns of vascular plants in a mixed mire. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2008, 142(1): 79-86.
- [19] Vitt D H, Chee W L. The relationships of vegetation to surface water chemistry and peat chemistry in fens of Alberta, Canada. *Vegetatio*, 1990, 89(2): 87-106.
- [20] Wheeler B D, Proctor M C F. Ecological gradients, subdivisions and terminology of north-west European mires. *Journal of Ecology*, 2000, 88(2): 187-203.
- [21] 杜耘, 蔡述明, 王学雷, 何报寅, 徐贵来, 江明喜, 薛怀平, 肖飞. 神农架大九湖亚高山湿地环境背景与生态恢复. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(6): 915-919.
- [22] 刘林峰, 周先华, 高健, 刘梅群, 潘晓斌, 贺磊, 蔡世耀, 赵以军, 潘超, 王卉君, 张佳敏, 叶有旺, 刘伟. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 417-430.
- [23] 陈旭, 卜兆君, 王升忠, 李鸿凯, 姜丽红. 长白山哈泥泥炭地 7 种苔藓分布与环境关系研究. *湿地科学*, 2008, 6(2): 310-315.
- [24] Li T T, Wang Z X, Bu G J, Lin L Q, Lei Y, Liu C Y, Yang L F, Zheng C L. Effects of microtopography and water table on *Sphagnum palustre* L. in subtropical high mountains and implications for peatland restoration. *Journal of Bryology*, 2019, 41(2): 121-134.
- [25] 燕红. 泥炭沼泽湿地植被演替规律及植物多样性研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [26] van Breemen N. How *Sphagnum* bogs down other plants. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, 10(7): 270-275.
- [27] Thompson D K, Waddington J M. *Sphagnum* under pressure: towards an ecohydrological approach to examining *Sphagnum* productivity. *Ecohydrology*, 2008, 1(4): 299-308.
- [28] Kim S, Kim Y, Kim Y, Kim K, Wang S, Kang H, Yoo B. Effects of planting method and nitrogen addition on *Sphagnum* growth in microcosm wetlands. *Paddy and Water Environment*, 2014, 12(1): 185-192.
- [29] Grosvernier P, Matthey Y, Buttler A. Growth potential of three *Sphagnum* species in relation to water table level and peat properties with implications for their restoration in cut-over bogs. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34(2): 471-483.
- [30] Schouwenaars J M. The impact of water management upon groundwater fluctuations in a disturbed bog relict. *Agricultural Water Management*, 1988, 14(1/4): 439-449.
- [31] Tuittila E S, Vasander H, Laine J. Sensitivity of C sequestration in reintroduced *Sphagnum* to water-level variation in a cutaway peatland. *Restoration Ecology*, 2004, 12(4): 483-493.
- [32] Smolders A J P, Tomassen H B M, Pijnappel H W, Lamers L P M, Roelofs J G M. Substrate-derived CO₂ is important in the development of *Sphagnum* spp. *New Phytologist*, 2001, 152(2): 325-332.
- [33] Verhoeven J T A, Liefveld W M. The ecological significance of organochemical compounds in *Sphagnum*. *Acta Botanica Neerlandica*, 1997, 46(2): 117-130.
- [34] Pouliot R, Rochefort L, Karofeld E, Mercier C. Initiation of *Sphagnum* moss hummocks in bogs and the presence of vascular plants: is there a link? *Acta Oecologica*, 2011, 37(4): 346-354.
- [35] Heijmans M M P D, Klees H, Berendse F. Competition between *Sphagnum magellanicum* and *Eriophorum angustifolium* as affected by raised CO₂ and increased N deposition. *Oikos*, 2002, 97(3): 415-425.