

DOI: 10.5846/stxb202104211042

韩锦华, 张朝晖, 王智慧. 水位控制对农田泥炭藓产量的影响. 生态学报, 2022, 42(11): 4582-4591.

Han J H, Zhang Z H, Wang Z H. Effects of water level control on sphagnum yield in farmland. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4582-4591.

# 水位控制对农田泥炭藓产量的影响

韩锦华<sup>1</sup>, 张朝晖<sup>1,\*</sup>, 王智慧<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001

<sup>2</sup> 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550001

**摘要:**为明确不同水位控制下农田土壤因子与泥炭藓产量之间的关系,解析影响泥炭藓产量的主要土壤因子,以贵州省龙里县水苔村种植年限相同的泥炭藓为研究对象,分析不同水位条件下泥炭藓生理生态指标与土壤因子的特征,并结合冗余分析,讨论水位和土壤因子的交互作用对泥炭藓生理生态指标的影响。结果表明:水苔村种植泥炭藓有 1 科 1 属 5 种,其中泥炭藓原亚种(*Sphagnum palustre* L. ssp. *palustre*)为优势种。泥炭藓生理生态指标均随水位升高逐渐上升,表明高水位有利于泥炭藓生长;土壤含水量(SWC, Soil Water Content)和孔隙度(STP, Soil Porosity)随水位升高逐渐增大,表明水位升高有助于增强土壤透水、透气及蓄水保墒能力;总氮(TN, Total Nitrogen)、总磷(TP, Total Phosphorus)、总钾(TK, Total Potassium)、有效磷(AP, Available Phosphorus)随水位升高逐渐降低,表明水位升高加速氮磷钾等营养元素淋失;脲酶(URE, Urease)和过氧化氢酶(CAT, Catalase)随水位升高逐渐增大,表明土壤水分含量有助于提高土壤酶活性。相关性分析结果表明:土壤因子 TN、TP、TK、AP 与 *S. palustre* 生理生态指标呈显著负相关,推测氮磷钾等营养元素可能抑制泥炭藓生长;其余土壤因子与 *S. palustre* 生理生态指标呈显著正相关,其中水位(Wat, Water Level)、URE、SWC 呈极显著正相关,表明 Wat、URE、SWC 可能有助于泥炭藓生长。结论:增加泥炭藓产量,一方面需确保土壤为酸性环境且营养贫瘠,另一方面需提高厢沟水位至 0cm—5cm,增大土壤孔隙度及松弛度。

**关键词:**水位;泥炭藓产量;生理生态指标;土壤因子;冗余分析(RDA)

## Effects of water level control on sphagnum yield in farmland

HAN Jinhua<sup>1</sup>, ZHANG Zhaohui<sup>1,\*</sup>, WANG Zhihui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

<sup>2</sup> School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

**Abstract:** This study aims to reveal the relationship between farmland soil factors and production of *Sphagnum* under the conditions of different water levels, then reveals the most primary soil factor which affected the output of *Sphagnum*. *Sphagnum* with similar planting ages was collected as research object in Shuitai Village, Longli country, Guizhou Province. Combined with Redundancy analysis, the impacts of interaction between different water levels and soil factors on the characteristics of the *Sphagnum* physiological and ecological indexes were discussed. The results indicated that after identification, 5 *Sphagnum* species with the same genus were found, among which *Sphagnum palustre* L. ssp. *Palustre* was the dominant species. The physiological and ecological indexes increased with the rise of water level, which indicated that the higher water level would make for the growth of *Sphagnum*. Soil Water Content (SWC) and soil porosity (STP) increased as the water level rose, indicating that the rise of water level played a certain role in enhancing soil permeability, air permeability, and water storage capacity. Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK) and

**基金项目:**国家自然科学基金(31960044);贵州省科技厅基金项目(黔科合平台人才[2019]号)

**收稿日期:**2021-04-21; **网络出版日期:**2022-02-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: academiclife@126.com

available phosphorus (AP) were dropped down as the water level rose, indicating that the higher water level may accelerate the leaching of nutrient elements such as nitrogen, phosphorus and potassium. Urease (URE) and catalase (CAT) were growing with the rise of water level, which can be inferred that soil moisture content can improve soil enzyme activity. The physiological and ecological indexes of *S. palustre* showed a clearly negative correlation with soil factors such as TN, TP, TK and AP ( $P < 0.05$ ), speculating that nutrient elements like N, P and K may inhibit the growth of *Sphagnum*. The other soil factors were significantly correlated positively with indexes of *S. perustre* ( $P < 0.05$ ), among which water level (WAT), URE and SWC also showed a clear positive correlation ( $P < 0.01$ ), indicating that WAT, URE and SWC may contribute to the growth of spitmoss. However, it is necessary to ensure that the soil is acidic and nutri-poor in order to increase the yield of *Sphagnum*. It is important to increase the water level of the groove to about 0—5cm with increasing the porosity and relaxation of the soil.

**Key Words:** Water level; *Sphagnum* yields; physio-ecological index; soil factor; redundancy analysis (RDA)

泥炭藓属植物(*Sphagnum*)是一类形态特殊、分布广泛的苔藓植物<sup>[1]</sup>,由于其具有强大的吸水性和天然抗菌性,所以被广泛应用于园艺花卉、工业污水处理、医药、瓜果蔬菜保鲜、清新空气等领域<sup>[2]</sup>,市场需求量大,应用前景广阔。水苔村(水苔即泥炭藓商品名)是我国首个以泥炭藓命名的村庄,据 2020 年统计,水苔村泥炭藓种植面积达 233 hm<sup>2</sup>,占总耕地面积 40%,产值约是当地水稻产值的 3 至 4 倍<sup>[3]</sup>,被当地政府列为精准扶贫项目,形成经济、社会和环境效益共同增长的良好态势。但相比于进口泥炭藓,国产泥炭藓具有产量低,茎叶纤细,绒毛稀少,耐分解能力差等缺点<sup>[4]</sup>。

苔藓植物是由水生向陆生环境过渡的植物类群<sup>[5]</sup>,因其没有真正的根,缺乏疏导组织,所以主要通过体表从外部环境直接吸收水分<sup>[6]</sup>。泥炭藓属植物(*Sphagnum*)作为一种特殊的苔藓植物,没有气孔和根,水分对泥炭藓生长有显著影响<sup>[7-8]</sup>。在没有灌溉条件或者灌溉系统不完善的地方,泥炭藓生长受到了严重抑制,限制了泥炭藓的经济效益和环境效益。国内外关于水位对自然状态下生长的泥炭藓的影响进行了大量的研究,杨盼盼<sup>[9]</sup>和郑星星<sup>[10]</sup>等人研究了不同水位对泥炭沼泽湿地恢复的影响;Manukjanová<sup>[11]</sup>等人研究发现中欧多地泥炭藓受低水位影响成活率显著下降;葛佳丽<sup>[12]</sup>等人在室内模拟水位条件下,选取 3 种泥炭藓为实验材料进行研究,结果表明低水位对 3 种泥炭藓的生物量、株高、萌蘖数均有抑制效应;Bu<sup>[13]</sup>等人研究表明水位降低显著抑制大泥炭藓(*Sphagnum palustre*)、尖叶泥炭藓(*S. capillifolium*)和喙叶泥炭藓(*S. fallax*)的株高、萌蘖数及生物量;Sardans<sup>[14]</sup>等人通过室内试验发现水位影响泥炭藓营养来源及化学计量特征;Strack<sup>[15]</sup>等人在加拿大魁北克地区利用排水系统对泥炭藓进行了 25 a 的水位下降处理,发现低水位抑制泥炭藓的光合作用;Bates<sup>[16]</sup>等人研究发现低水位会导致苔藓总盖度下降,相反适度增加水分会提高泥炭藓的生物量。目前,关于泥炭藓的研究主要集中在沼泽湿地或室内实验的研究,而对农田泥炭藓种植产业的研究鲜见报道,对农田泥炭藓在不同水位条件下,多个土壤因子对泥炭藓产量影响的分析报道更少。因此,农田泥炭藓生长环境的控制、增产提质手段等方面的研究迫在眉睫。

本文以贵州省龙里县水苔村农田泥炭藓为研究对象,分析不同水位泥炭藓优势种生理生态指标与土壤因子差异性,结合冗余分析筛选影响泥炭藓生长性状的主要土壤因子,探讨如何高产高效种植泥炭藓。旨在为科学高效种植泥炭藓及田间管理提供理论依据,进而提高农民收入,助推乡村振兴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本研究区域位于黔中腹地、苗岭山脉中段<sup>[17]</sup>;地处东经 106°45′18″—107°15′1″,北纬 26°10′19″—26°49′33″之间;海拔 1556—1582 m;地势西南高,东北低,中部隆起,山地、丘陵、盆地、河谷相互交错;气候属于亚热带季风湿润气候,温和舒适,日照充沛,冬无严寒,夏无酷暑,年平均气温 14.8℃,最冷月均温 4.6℃,最热月均温

23.6℃;年降水量 1100 mm 左右,多集中在夏季;土壤类型以酸性黄壤土为主<sup>[17]</sup>,具备泥炭藓生长的有利气象条件。截止 2020 年,水苔村泥炭藓种植面积达 233 hm<sup>2</sup>,其中高产面积 67 hm<sup>2</sup>,年产泥炭藓 20 万 kg,产值达 330 万元,为当地的经济支柱型产业<sup>[3]</sup>。

## 1.2 试验设计

2020 年 7 月,基于前期走访调查,选取贵州龙里县水苔村泥炭藓种植年限、地势、水位和土壤较为一致的农田,受排水沟限制,选择 31m×10m 的区域设置样地。厢沟水位(即水位线距地面的距离)设置 3 个水平<sup>[18]</sup>:高水位(0—5 cm)、中水位(15—20 cm)、低水位(25—30 cm),每个水平做 3 个生物学重复,共 9 个 10 m×3 m 样地,样地间距 0.5 m。木板拦堵排水沟控制水位<sup>[9]</sup>。

## 1.3 样本采集

于 2021 年 1 月采集泥炭藓及土壤样品。按照 S 型取样法,每个样地选取 5 个采样点,采集 30 cm×30 cm 样方框内全部泥炭藓,用不透光塑封袋带回室内测生理生态指标;根据五点四分法,用环刀、铝盒采集泥炭藓对应的原状表层土壤,每层重复取样 3 个,带回实验室进行土壤容重、含水量、总孔隙度等物理指标的测定。

## 1.4 室内分析

本研究分析的泥炭藓生理生态指标包括株高(Pla)、主茎粗(Ste)、萌蘖数(Til)、生物量(Bio)、叶绿素含量(Chl)和优势种盖度(Cov)。测试方法分别为:株高和主茎粗采用直尺测量;萌蘖数采用计数法;生物量采用 65℃ 恒温箱烘干称重法<sup>[19]</sup>;叶绿素采用 722 型分光光度计<sup>[20]</sup>;盖度采用目视估计法<sup>[21]</sup>估算各物种的分盖度与样方植被总盖度,取平均值。分析的土壤因子包括容重(BD)、孔隙度(STP)、含水量(SWC)、脲酶(URE)、过氧化氢酶(CAT)、pH、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、有效磷(AP)、有效钾(AK)、有机碳(SOC)。测试方法分别为:BD 和 STP 采用环刀浸水法测定<sup>[22]</sup>;SWC 采用铝盒烘干法测定;URE 采用靛酚蓝比色法测定<sup>[23]</sup>;CAT 采用高锰酸钾滴定法测定<sup>[24]</sup>;pH 采用水土比为 2.5:1 的悬液 pH 计测定;TN 利用全自动凯氏定氮法测定;TP 含量测定采用硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法;TK 含量测定采用碱融-火焰光度计法;AP 含量测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;AK 含量测定采用醋酸铵浸提-火焰光度法;SOC 采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定。

## 1.5 数据处理与统计

$$\text{重要值: } IV = (\text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 200 \quad (1)$$

$$\text{生态优势度: } C = \sum_{i=1}^s \left( \frac{IV_i}{IV} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{生态位宽度: } B_i = 1 / \sum_{j=1}^n P_{ij}^2 \quad (3)$$

式中:相对盖度或频度指某一种的盖度或频度占全部种盖度或频度的百分比, $S$  为样地内群落个数, $IV_i$  为群落  $i$  的重要值, $IV$  为群落中所有群落的重要值之和, $P_{ij}$  为群落  $i$  在  $j$  个资源状态下的盖度占该群落所有盖度的比例, $B_i$  的范围为  $1-n$ 。

$$\text{叶绿素含量: } C_{\text{总}} = C_{\text{叶绿素a}} + C_{\text{叶绿素b}} = 8.02OD_{663} + 20.21OD_{645} \quad (4)$$

式中: $OD_{663}$  为 663nm 处的光密度值, $OD_{645}$  为 645nm 处的光密度值。

数据分析在 SPSS 19.0 中进行,采用方差分析对数据进行齐性检验,采用排序法及 Pearson 分析法研究泥炭藓生理生态特征与土壤因子之间的相关性;采用 Canoco 5.0 分析泥炭藓生理生态指标与土壤因子的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 泥炭藓物种多样性统计分析

经鉴定,水苔村农田泥炭藓种植区域共有 5 种泥炭藓,分别为:泥炭藓原亚种(*Sphagnum palustre*),卵叶泥炭藓(*S. ovatum*),拟宽叶泥炭藓(*S. platyphylloides*),垂枝泥炭藓(*S. jensenii*)和多纹泥炭藓(*S. multifibrosum*) (表 1)。统计发现,每个样地中泥炭藓原亚种盖度最高,平均盖度为 80.29%,约占泥炭藓总盖度的 88.33%。

为进一步证明泥炭藓原亚种为该地区优势种,分别计算了每个样地中各泥炭藓的重要值、生态优势度和生态位宽度,其中泥炭藓原亚种的三项指标均为最大值,变化范围依次为 0.91—0.98、0.131—0.421、1.242—1.792,表明泥炭藓原亚种在该区域占有重要的生态地位,对该区域环境具有较强的生态适应能力,为该地区优势种。

表 1 农田泥炭藓种植样地及优势种基本信息  
Table 1 Basic information of planting sphagnum plots and dominant species

| 样地<br>Sample plot | 水位/cm<br>Water table | 各物种相对盖度<br>Average coverage<br>of each species | 平均盖度<br>Average<br>coverage | 重要值<br>Importance<br>value | 生态优势度<br>Ecological<br>dominance | 生态位宽度<br>Niche breadth |
|-------------------|----------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------|
| 1                 | 28.1                 | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 82%                  | 90.50%                      | 0.91                       | 0.131                            | 1.792                  |
|                   |                      | 拟宽叶泥炭藓 <i>S. platyphylloides</i> 10%           |                             | 0.55                       | 0.048                            | 1.208                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 5%                      |                             | 0.53                       | 0.045                            | 0.980                  |
|                   |                      | 垂枝泥炭藓 <i>S. jensenii</i> 3%                    |                             | 0.52                       | 0.041                            | 0.723                  |
| 2                 | 28.7                 | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 90%                  | 81.50%                      | 0.95                       | 0.223                            | 1.472                  |
|                   |                      | 拟宽叶泥炭藓 <i>S. platyphylloides</i> 7%            |                             | 0.54                       | 0.072                            | 0.197                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 3%                      |                             | 0.52                       | 0.067                            | 0.106                  |
| 3                 | 27.2                 | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 86%                  | 81.90%                      | 0.93                       | 0.216                            | 1.459                  |
|                   |                      | 拟宽叶泥炭藓 <i>S. platyphylloides</i> 8%            |                             | 0.54                       | 0.073                            | 0.158                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 6%                      |                             | 0.53                       | 0.070                            | 0.158                  |
| 4                 | 14.8                 | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 84%                  | 93.80%                      | 0.92                       | 0.135                            | 1.590                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 10%                     |                             | 0.55                       | 0.048                            | 0.974                  |
|                   |                      | 垂枝泥炭藓 <i>S. jensenii</i> 4%                    |                             | 0.52                       | 0.043                            | 0.475                  |
|                   |                      | 多纹泥炭藓 <i>S. multifibrosum</i> 2%               |                             | 0.51                       | 0.042                            | 0.391                  |
| 5                 | 14.6                 | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 90%                  | 88.00%                      | 0.95                       | 0.226                            | 1.623                  |
|                   |                      | 拟宽叶泥炭藓 <i>S. platyphylloides</i> 4%            |                             | 0.52                       | 0.068                            | 0.756                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 6%                      |                             | 0.53                       | 0.070                            | 0.256                  |
| 6                 | 14.9                 | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 95%                  | 86.50%                      | 0.98                       | 0.421                            | 1.280                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 5%                      |                             | 0.53                       | 0.123                            | 0.445                  |
| 7                 | 4.3                  | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 92%                  | 98.70%                      | 0.96                       | 0.410                            | 1.314                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 8%                      |                             | 0.54                       | 0.130                            | 0.144                  |
| 8                 | 2.9                  | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 88%                  | 97.90%                      | 0.94                       | 0.221                            | 1.315                  |
|                   |                      | 拟宽叶泥炭藓 <i>S. platyphylloides</i> 6%            |                             | 0.53                       | 0.070                            | 0.172                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 6%                      |                             | 0.53                       | 0.070                            | 0.153                  |
| 9                 | 4.2                  | 泥炭藓原亚种 <i>S. palustre</i> 89%                  | 99.30%                      | 0.95                       | 0.143                            | 1.242                  |
|                   |                      | 拟宽叶泥炭藓 <i>S. platyphylloides</i> 6%            |                             | 0.53                       | 0.045                            | 0.293                  |
|                   |                      | 卵叶泥炭藓 <i>S. ovatum</i> 4%                      |                             | 0.52                       | 0.043                            | 0.587                  |
|                   |                      | 多纹泥炭藓 <i>S. multifibrosum</i> 1%               |                             | 0.51                       | 0.041                            | 0.438                  |

2.2 不同水位控制下优势种生理生态指标统计分析

为明确水位对 *S. palustre* 生长性状的影响,对不同水位控制下 *S. palustre* 生理生态指标做单因素方差分析及差异性检验(图 1),结果显示,*S. palustre* 的株高、主茎粗、萌蘖数、盖度、生物量值均随水位升高而增大,在高水位下达到最大值,分别为 32.70 cm、0.93 mm、2.80、83.9%、15.71 g/dm<sup>2</sup>;叶绿素含量在不同水位下无显著性差异( $P>0.05$ ),但高水位下叶绿素含量(158.36 pmol/L)高于中、低水位条件下含量。综上所述,*S. palustre* 的生理生态指标均随水位的增高逐渐增大,在高水位条件下达到最大值。

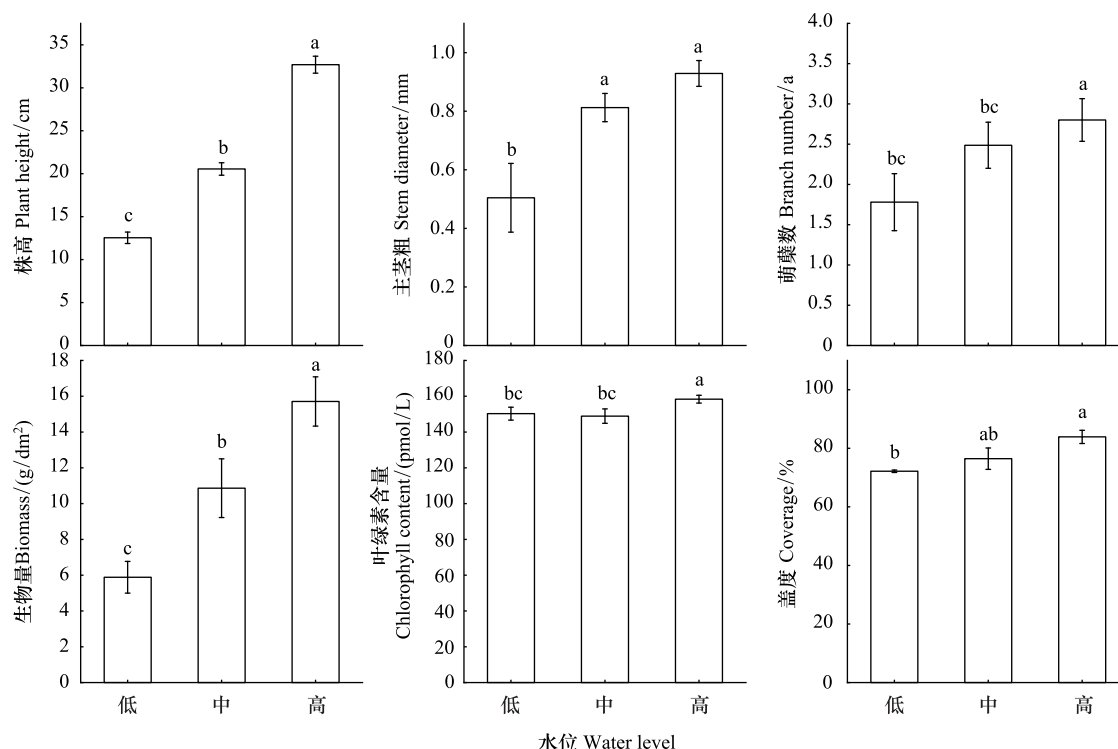


图1 不同水位下泥炭藓生理生态指标单因素方差分析

Fig.1 One-way ANOVA of physiological and ecological indexes of *sphagnum* in different water levels

不同小写字母表示不同水位下泥炭藓生理生态指标有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 相同小写字母表示不同水位下泥炭藓生理生态指标无显著性差异 ( $P > 0.05$ ); 字母 L, M, H 分别表示低水位, 中水位, 高水位, 下表相同

## 2.3 不同水位控制下土壤因子统计分析

为明确水位对泥炭藓种植地土壤环境的影响, 对不同水位控制下土壤因子做单因素方差分析及差异性检验 (图2), 结果显示, 不同水位下 BD、TN、AP、TP 含量随水位的升高逐渐降低, 在高水位达最小值, 分别为  $0.57 \text{ g/cm}^3$ 、 $11.87 \text{ mg/g}$ 、 $7.96 \text{ }\mu\text{g/g}$ 、 $12.11 \text{ }\mu\text{g/g}$ ; SWC、STP、URE、CAT、SOC 含量随水位的升高逐渐增大, 在高水位达最大值, 分别  $99\%$ 、 $55\%$ 、 $1197.87 \text{ mg/g}$ 、 $8.51 \text{ mL/g}$ 、 $107.31 \text{ }\mu\text{g/g}$ ; pH、AK 含量亦随着水位的升高逐渐增大, 但中水位与高水位含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ); TK 在低水位为最大值  $30.84 \text{ }\mu\text{g/g}$ , 中水位与高水位含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。综上所述, 土壤因子均随水位变化不同程度产生响应, 除 TK 含量随水位变化无显著规律外, 其余土壤因子均呈现递增或递减的规律。

## 2.4 不同水位控制下泥炭藓生理生态指标与土壤因子的相关性分析

### 2.4.1 泥炭藓生理生态指标与土壤因子 Pearson 相关性分析

为了探究 *S. palustre* 生长性状与土壤因子之间的相关程度, 对不同水位控制下 *S. palustre* 生理生态指标和土壤因子间做 Pearson 相关分析 (表2), 结果显示, BD、TN、TK、TP、AP 与 *S. palustre* 生理生态指标呈负相关, 说明土壤中氮磷钾等营养元素抑制 *S. palustre* 的生长; 株高 (Pla) 与 TK、AK 无显著相关性 ( $P > 0.05$ ), 与其余土壤因子均不同程度相关, 相关性大小为  $\text{URE} > \text{Wat} > \text{SWC} > \text{CAT} > \text{pH} > \text{SOC} > \text{STP}$ ; 主茎粗 (Ste) 与 SWC、URE、CAT、pH、Wat 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 Wat 和 URE 相关系数较大, 说明影响 *S. palustre* 主茎粗的主要因素为水位和脲酶; SWC、STP 与叶绿素含量 (Chl) 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 萌蘖数 (Til) 和盖度 (Cov) 与土壤因子 Wat、URE、SWC、pH、STP、SOC 呈显著正相关性 ( $P < 0.05$ ), 与 Wat 和 URE 相关系数较大, 说明水位和脲酶是影响萌蘖数和盖度的主要土壤因子; 生物量 (Bio) 和土壤因子均呈显著相关性 ( $P < 0.05$ ), 其中与 Wat 相关系数最大。综上所述, 水位和脲酶含量是影响泥炭藓生长状况的主要因子。

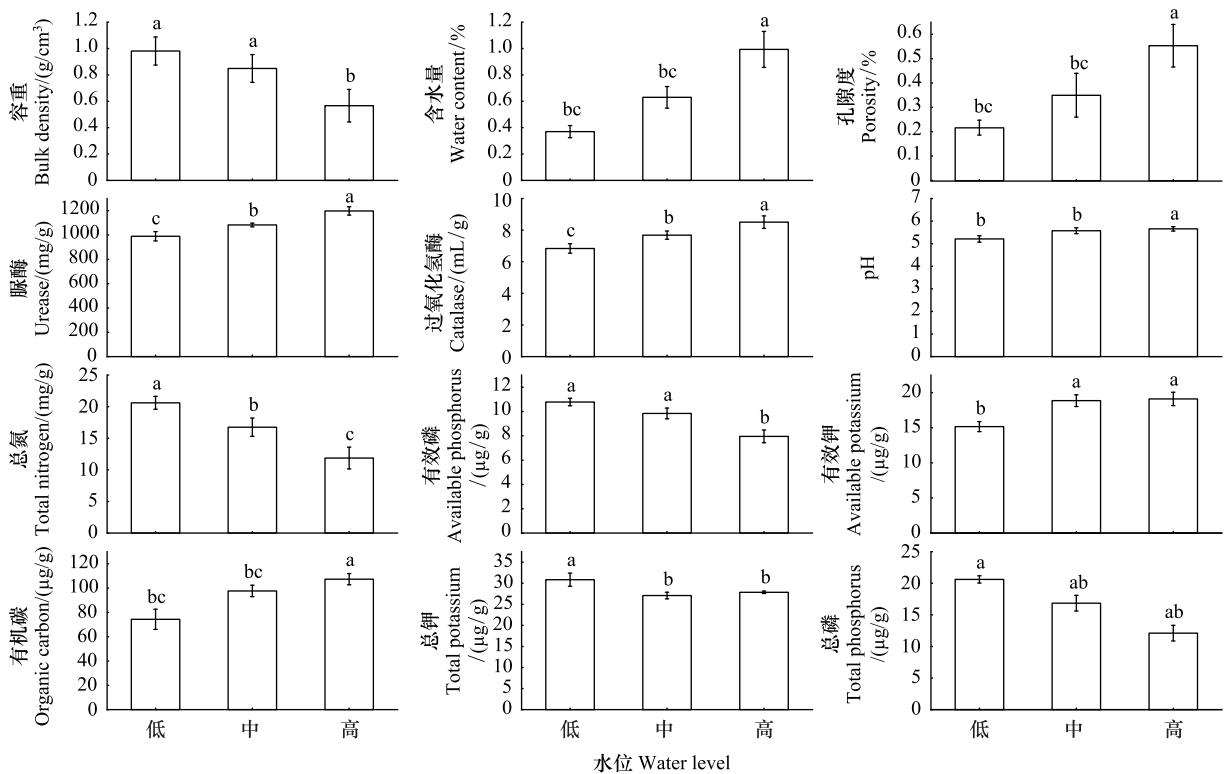


图 2 不同水位下土壤因子单因素方差分析  
Fig.2 One-way ANOVA of soil indexes in different water levels

表 2 *S.palustre* 生理生态指标与土壤因子的相关性分析

| 土壤因子<br>Soil factors                  | 泥炭藓生理生态指标 <i>Sphagnum</i> physio-ecological index |                      |                |                    |                       |                |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------|----------------|--------------------|-----------------------|----------------|
|                                       | 株高<br>Plant height                                | 主茎粗<br>Stem diameter | 生物量<br>Biomass | 叶绿素<br>Chlorophyll | 萌蘖数<br>Tillers number | 盖度<br>Coverage |
| 容重 Bulk density/( g/cm <sup>3</sup> ) | -0.741 *                                          | -0.651               | -0.646         | -0.681 *           | -0.667 *              | -0.761 *       |
| 含水量 Water content/%                   | 0.836 **                                          | 0.823 **             | 0.947 **       | 0.716 *            | 0.782 **              | 0.851 **       |
| 孔隙度 Soil porosity/%                   | 0.741 **                                          | 0.760 *              | 0.804 **       | 0.704 *            | 0.718 *               | 0.761 *        |
| 总氮 Total nitrogen/( mg/g)             | -0.732 *                                          | -0.661               | -0.773 *       | -0.241             | -0.673 *              | -0.525         |
| 总钾 Total potassium/( μg/g)            | -0.504                                            | -0.797 *             | -0.440         | -0.326             | -0.500                | -0.532         |
| 总磷 Total phosphorus/( μg/g)           | -0.932 **                                         | -0.832 **            | -0.925 **      | -0.658             | -0.823 **             | -0.778 *       |
| 有效磷 Available phosphorus/( μg/g)      | -0.752 *                                          | -0.654               | -0.743 *       | -0.651             | -0.796 *              | -0.956 **      |
| 有效钾 Available potassium/( μg/g)       | 0.652                                             | 0.743 *              | 0.753 *        | 0.234              | 0.540                 | 0.501          |
| 有机碳 Organic carbon/( μg/g)            | 0.758 *                                           | 0.412                | 0.857 **       | 0.229              | 0.717 *               | 0.707 *        |
| 脲酶 Urease/( mg/g)                     | 0.930 **                                          | 0.836 **             | 0.838 **       | 0.347              | 0.805 **              | 0.851 **       |
| 过氧化氢酶 Catalase/( mL/g)                | 0.810 *                                           | 0.808 **             | 0.741 *        | 0.596              | 0.521                 | 0.506          |
| pH ( Soil)                            | 0.769 *                                           | 0.816 **             | 0.870 **       | 0.282              | 0.726 *               | 0.736 *        |
| 水位 Water level/cm                     | 0.839 **                                          | 0.941 **             | 0.964 **       | 0.627              | 0.847 **              | 0.896 **       |

\* 表示在 0.05 水平 ( 双侧) 上显著相关; \* \* 表示在 0.01 水平 ( 双侧) 上极显著相关

#### 2.4.2 泥炭藓生理生态指标与土壤因子相关关系的冗余分析

为进一步明确影响 *S.palustre* 生长性状的主要土壤因子及其对 *S.palustre* 生长性状影响程度大小,首先对土壤因子进行除趋势对应分析(DCA),得出排序轴梯度长度(LGA),在本研究中,计算得出排序轴梯度长度

均小于 3,故选用冗余分析(RDA),然后对 12 个土壤因子采用蒙特卡洛检验,最终筛选出 7 个土壤因子和泥炭藓生理生态指标进行排序分析(图 3)。结果显示主成分轴 I 和轴 II 的特征值分别为 0.8785 和 0.1003,即前 2 个轴共解释了 97.88%的物种对环境的适应特征,由此可知第 I 轴和第 II 轴能够很好的解释泥炭藓生理生态指标与土壤因子的关系,且主要由第 I 轴决定。pH、SWC、URE 与 *S.palustre* 生理生态指标呈正相关,TK、TP、TN、AP 与 *S.palustre* 生理生态指标呈负相关,说明土壤 pH、含水量、脲酶含量利于泥炭藓生长,氮磷钾含量抑制泥炭藓生长。综上所述,pH、SWC、URE、TK、TP、TN、AP 是影响 *S.palustre* 生长的主要因子,且各因子的影响存在功能冗余。通过冗余分析进一步提取出各因子对 *S.palustre* 生理生态的简单效应和条件效应,从而更加明确各土壤因子对泥炭藓生长性状贡献率(表 3),从简单效应来看,土壤因子 TP、URE、SWC、AP 对 *S.palustre* 生长性状的影响达极显著水平( $P<0.01$ ),差异性解释量分别为 82.7%、77.7%、62.6%、57.7%;AP 对 *S.palustre* 生长性状的影响达显著水平( $P<0.05$ ),解释量为 58.6%。从条件效应来看,*S.palustre* 生长性状主要受 TP、TN、TK、AP 的影响,分别解释了 *S.palustre* 生长性状信息的 82.7%、4.4%、4.4%、3.6%,累计解释量为 95.1%。

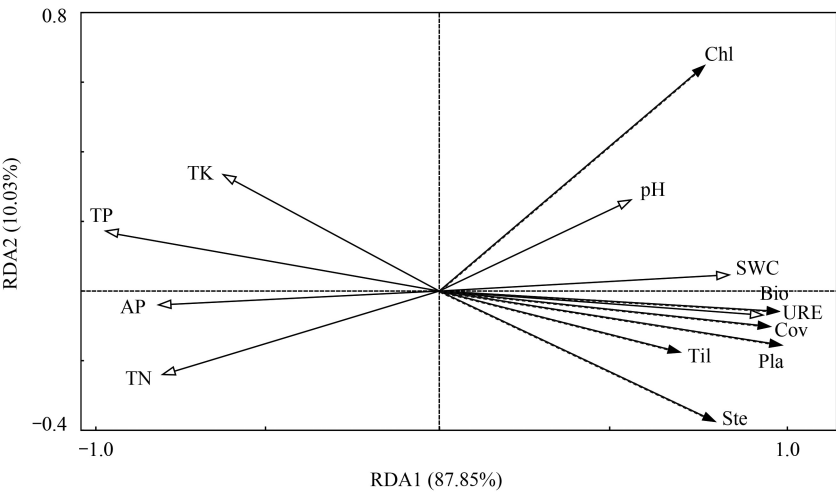


图 3 *S.palustre* 生理生态指标与土壤因子的 RDA 二维排序图

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) two-dimensional ordination diagram of *S.palustre* and soil factors

图中带箭头实线代表土壤因子,带箭头虚线代表 *S.palustre* 生理生态指标。Chl: 叶绿素含量, Chlorophyll; Bio: 生物量, Biomass; Cov: 盖度, Coverage; Pla: 株高, Plant height; Ste: 主茎粗, Stem diameter; Til: 萌蘖数, Tillers number

表 3 土壤因子解释量和显著性检验

Table 3 Explanation rate of soil factors and Duncan test

| 类型 Type                    | 土壤因子 Soil factors | 解释度 Explanation rate/% | Pseudo- <i>F</i> | <i>P</i> |
|----------------------------|-------------------|------------------------|------------------|----------|
| 简单效应<br>Simple team effect | 总磷/(μg/g)         | 82.7                   | 33.5             | 0.002    |
|                            | 脲酶/(mg/g)         | 77.7                   | 24.3             | 0.004    |
|                            | 含水量/%             | 62.6                   | 11.7             | 0.008    |
|                            | 总氮/(mg/g)         | 57.7                   | 9.5              | 0.008    |
|                            | 有效磷/(μg/g)        | 58.6                   | 9.9              | 0.012    |
|                            | 总钾/(μg/g)         | 36.2                   | 4.0              | 0.096    |
|                            | pH(Soil)          | 28.9                   | 2.8              | 0.106    |
| 条件效应<br>Conditional effect | 总磷/(μg/g)         | 82.7                   | 33.5             | 0.002    |
|                            | 总氮/(mg/g)         | 4.4                    | 2.1              | 0.154    |
|                            | 含水量/%             | 1.5                    | 0.7              | 0.574    |
|                            | 总钾/(μg/g)         | 4.4                    | 2.5              | 0.122    |
|                            | 有效磷/(μg/g)        | 3.6                    | 3.2              | 0.118    |
|                            | pH (Soil)         | 1.5                    | 1.6              | 0.350    |
|                            | 脲酶/(mg/g)         | 1.5                    | 3.8              | 0.224    |
|                            | Sum               | 99.6                   |                  |          |

### 3 讨论

#### 3.1 水位对泥炭藓生理生态指标的影响

水位梯度是泥炭地最为重要的生态梯度<sup>[25-28]</sup>,水位高低影响泥炭藓的生长和生理特征,从而影响其生存、发育和分布<sup>[29]</sup>。水分不足会削弱苔藓植物的光合作用,影响其正常生长<sup>[30-31]</sup>。株高、主茎粗、萌蘖数为泥炭藓的表观形态,可以直观反映泥炭藓的营养状况,是快速判断泥炭藓是否可以收割以及估算泥炭藓生物量的重要指标<sup>[11]</sup>。本研究表明,泥炭藓株高、主茎粗、萌蘖数与水位呈显著正相关,说明增加水分含量有助于泥炭藓生长。这与 Grosvernier<sup>[8]</sup>,胡雪凤<sup>[12]</sup>,葛佳丽<sup>[32]</sup>等的研究结果一致,低水位是限制 *S.pal* 生长的关键因素,因此建议将水苔村农田泥炭藓种植地厢沟水位由 15—20 cm 上调至 0—5 cm,可能更有利于实现增产目标。生物量和盖度是反映物种在群落中功能和作用大小的生态学指标,在植物分析中扮演非常重要的角色<sup>[20]</sup>。本研究表明,水苔村 *S.pal* 的盖度最高,生物量最大,为该区域的优势种,因此建议当地推广种植 *S.pal*。叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,植物体中叶绿素含量的高低在很大程度上反映了植物的光能吸收、转化和传递能力,且叶绿素含量与叶片光合速率、外界环境条件等密切相关,通常可通过测定叶绿素含量来表征植物光合作用能力及生命活动强弱<sup>[5]</sup>。在诸多环境条件中,水分是影响叶绿素合成的主要条件之一<sup>[20]</sup>。本研究中泥炭藓叶绿素含量变化趋势与刘正刚<sup>[33]</sup>、麻俊虎<sup>[5]</sup>等人研究结果基本一致,即在高水位条件下,叶绿素含量达最大值,因为高水位条件下光照降低,泥炭藓为了适应低光胁迫,不断增强光和作用能力,最终达到耗-益的最大获取,从而进一步适应环境;相反,在低水位条件下,过强的光照环境将导致植物光和能力下降,从而影响泥炭藓叶绿素的合成,促使已合成的叶绿素分解使其含量下降,进而对植物的生长产生抑制作用。

#### 3.2 水位对土壤因子的影响

土壤是生态系统的重要组成部分,为泥炭藓生长提供了生长发育场所和矿质养分<sup>[34]</sup>,土壤通过供给泥炭藓所必须的水分及营养物质而与周围生态系统有着紧密的联系<sup>[35]</sup>。土壤质量的好坏直接影响着泥炭藓的生长环境和品质优劣,关系到农民的经济收入和环境的可持续发展。评价农田泥炭藓种植地土壤质量的指标主要由土壤物理指标、肥力指标和土壤酶组成<sup>[36]</sup>。SWC、ST、BD 值大小与土壤质地、结构、松紧以及有机质含量等因子有关<sup>[37]</sup>。本研究表明,随水位升高,BD 与水位呈负相关,SWC 和 STP 与水位呈正相关,与张阳武等人<sup>[37]</sup>在泥炭沼泽地研究结果一致,表明高水位有利于降低土壤紧实度,增强土壤透水、透气性及蓄水保墒性。因此,在种植泥炭藓之前增加翻土、灌水这一步骤可能更有利于泥炭藓生长。土壤养分含量是衡量土壤肥力的有效指标之一<sup>[34]</sup>。本研究表明,土壤 TN、TP、TK、AP 与水位呈负相关,与管博<sup>[38]</sup>、庞喆<sup>[39]</sup>等研究结果一致,可能由于土壤水位过高会使土体内的氮磷钾等营养元素通过地表径流水和沉积物的横向迁移或随水分下渗形成的纵向迁移等途径流失,导致表土营养贫瘠,但在贫营养环境中泥炭藓却生长较好,由此推测泥炭藓对土壤营养物质需求较低,因此,应避免在泥炭藓种植地施肥。土壤酶是土壤生物化学反应的催化剂,其大小反映了土壤进行各种生物化学过程的强度与方向<sup>[40]</sup>,也可作为农业管理实践中土壤质量演变的生物活性指标<sup>[41]</sup>,土壤酶活性变化对土壤中碳、氮、磷等物质的转化强度和土壤健康状况反应十分敏感<sup>[42]</sup>。本研究表明土壤脲酶(URE)和过氧化氢酶(CAT)与土壤含水量(37%—99%)呈正相关,这是因为当土壤水位增高,微生物胞外酶与底物运输效率增大,增多了酶与底物的接触机率,土壤酶活性增大<sup>[43]</sup>,与靳振江<sup>[44]</sup>等人研究结果一致,因此泥炭地保持高水位有利于提高土壤酶活性,进而促进泥炭藓生长。土壤 pH 直接影响泥炭地养分的存在状态、转化和有效性,从而影响泥炭藓生长发育<sup>[45]</sup>。Bartels<sup>[46]</sup>、Soudzilovskaia<sup>[47]</sup>等人研究表明随着水位的升高,土壤处于缺氧环境,氧化还原电位的降低和还原条件下 H<sup>+</sup>的消耗导致土壤酸化。本研究表明 pH 含量与水位变化无显著相关性,可能原因有:研究区域土壤类型为酸性的腐殖质丰富的泥炭土,pH 值 5.0—6.7;泥炭藓能吸收钙和镁等阳离子并释放氢离子,从而酸化周围环境,以上原因使泥炭藓广泛分布于适宜其生存的酸性环境中,所以土壤酸碱度随水位无显著变化。

### 3.3 不同水位控制下泥炭藓生理生态指标与土壤因子的相关性

水位影响泥炭藓种植地土壤理化性质及泥炭藓生长,进而影响泥炭藓产量<sup>[48]</sup>。本研究对 *S. palustre* 生理生态特征与土壤因子相关分析表明,影响 *S. palustre* 存在的主要土壤因子为 TN、TK、TP、AP、SWC、URE、pH。其中 TN、TK、TP、AP 与 *S. palustre* 生理生态指标呈负相关,说明土壤中氮、磷、钾等营养元素抑制 *S. palustre* 的生长。王晓宇<sup>[45]</sup>通过人工栽培条件下研究表明营养试剂对泥炭藓具有抑制或毒害作用,甚至使其死亡;德国研究者在建立的试验区内分别控制其生长条件,实验结果表明施入磷、钾肥对泥炭藓生长影响不大,甚至适得其反<sup>[49]</sup>。从增产提质的角度出发,避免在泥炭藓种植地施氮肥、磷肥和钾肥,保持足够的含水量便能有效增加 *S. palustre* 的生物量,带来更大的经济效益。*S. palustre* 生理生态指标与主要影响因子的 RDA 分析结果表明 URE 与 TN、TP、TK 等呈负相关,说明 URE 活性一定程度反映土壤营养状况贫瘠。SWC、URE、pH 与 *S. palustre* 生理生态指标呈正相关,说明 *S. palustre* 在很大程度上依赖于土壤 SWC、URE 和 pH 含量。因此,从增产提质的角度出发,一方面应控制泥炭地土壤的酸碱度,避免使用含化肥农药的污废水灌溉;另一方面通过喷施特定量的马铃薯或红薯淀粉加工废水提高土壤 URE 含量<sup>[50]</sup>。

## 4 结论

本文以贵州省龙里县水苔村种植年限相同的泥炭藓及对应的土壤为研究对象,得出如下结论:

(1)在水苔村共发现 5 种泥炭藓,其中泥炭藓原亚种(*Sphagnum palustre*)的盖度、重要值、生态优势度和生态位宽度等指标均为最大值,表明 *S. palustre* 在该区域有非常重要的生态地位,对当地环境有较强的生态适应能力,建议当地推广种植 *S. palustre*。

(2)泥炭藓生理生态指标与水位呈极显著正相关,表明土壤含水量是限制泥炭藓生长的主要因素,建议将《贵州省黔南州地方标准 DB5227/T 083—2018》规定的农田泥炭藓种植地厢沟水位“15—20 cm”上调至 0—5 cm,可能更有利于实现增产目标,同时建议当地政府部门完善灌溉系统,修建水渠及沟坝,增加蓄水能力。

(3)土壤因子 SWC、STP 与水位呈显著正相关关系,表明增加水位有益于改变土壤质地、结构、松紧度;TN、TP、TK、AP 与水位呈显著负相关关系,表明水位促使土壤营养元素淋融,形成贫营养环境;因此推测泥炭藓更适合在土壤松弛、营养贫瘠的环境下生长。

### 参考文献(References):

- [1] Gaudig G, Krebs M, Prager A, Wichmann S, Barney M, Caporn S J M, Emmel M, Fritz C, Graf M, Grobe A, Pacheco S G, Hogue-Hugron S, Holzträger S, Irrgang S, Kämäräinen A, Karofeld E, Koch G, Köbbing J F, Kumar S, Matchutadze I, Oberpaur C, Oestmann J, Raabe P, Rammes D, Rochefort L, Schmilewski G, Sendžikaitė J, Smolders A, St-Hilaire B, van de Riet B, Wright B, Wright N, Zoch L, Joosten H. Sphagnum farming from species selection to the production of growing media: a review. *Mires and Peat*, 2017, 20: 13.
- [2] 何春梅, 张朝晖, 王智慧, 石匡正. 贵州麻若平台泥炭藓沼泽中泥炭藓持水特性及其与土壤营养元素关系研究. *植物科学学报*, 2020, 38(5): 618-626.
- [3] 孟宪民, 余江华. 我国水藓产业发展现状(下). *中国花卉报*, 2018-07-17(004).
- [4] Hoshi Y. Sphagnum growth in floating cultures: Effect of planting design. *Mires and Peat*, 2017, 20(8): 1-10.
- [5] 麻俊虎, 彭涛, 李大华. 中国泥炭藓属植物研究进展. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 35(1): 114-120.
- [6] Pedersen B, Hanslin H M, Bakken S. Testing for positive density-dependent performance in four bryophyte species. *Ecology*, 2001, 82(1): 70-88.
- [7] Rydin H, Jeglum J K. *The Biology of Peatlands*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.
- [8] 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 cutover bogs. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34(2): 471-483.
- [9] 杨盼盼, 刘宇, 卜兆君, 马进泽, 王升忠, 陈旭, 杨云荷. 水位提升和泥炭藓繁殖体移植对泥炭地植被恢复的影响. *植物研究*, 2019, 39(5): 699-706.
- [10] 郑星星, 卜兆君, 马进泽, 赵高林, 曾竞, 李善麟. 水位和竞争对三种泥炭藓生长的影响. *杭州师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 11(6): 485-489.
- [11] Manukjanová A, Štechová T, Kučera J. Drought survival test of eight fen moss species. *Cryptogamie, Bryologie*, 2014, 35(4): 397-403.
- [12] 葛佳丽, 卜兆君, 郑星星, 马进泽, 崔伟琳, 谷晓楠. 三种泥炭藓对干旱及植物相互作用的形态响应. *生态学杂志*, 2014, 33(9): 2363-2368.

- [13] Bu Z J, Zheng X X, Rydin H, Moore T, Ma J Z. Facilitation vs. Competition: does interspecific interaction affect drought responses in *Sphagnum*. *Basic and Applied Ecology*, 2013, 14(7): 574-584.
- [14] Sardans J, Peñuelas J. Drought changes nutrient sources, content and stoichiometry in the Bryophyte *Hypnum cupressiforme* Hedw. Growing in a Mediterranean forest. *Journal of Bryology*, 2008, 30(1): 59-65.
- [15] Strack M, Waddington J M, Lucchese M C, Cagampan J P. Moisture controls on CO<sub>2</sub> exchange in a *Sphagnum*-dominated peatland: results from an extreme drought field experiment. *Ecohydrology*, 2009, 2(4): 454-461.
- [16] Bates J W, Thompson K, Grime J P. Effects of simulated long-term climatic change on the bryophytes of a limestone grassland community. *Global Change Biology*, 2005, 11(5): 757-769.
- [17] 许玉凤, 潘网生, 张永雷. 贵州高原 NDVI 变化及其对气候变化的响应. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1507-1518.
- [18] 贵州省黔南州市场监督管理局. DB5227/T 083—2018 水苔生产技术规程. 贵州: 贵州省黔南州市场监督管理局发布, 2018.
- [19] 黄小娟, 侯扶江. 高寒典型草原主要物种的株高和盖度预测种群和群落地上生物量. *生态学报*, 2021, 41(12): 4942-4952.
- [20] 潘瑞炽. 植物生理学(第七版). 北京: 高等教育出版社, 2012: 56-58.
- [21] 张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 85-93.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 3-35.
- [23] 关松荫. 化学农药对土壤脲酶活性抑制作用的研究. *土壤通报*, 1992, 23(5): 232-233.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986: 294-297.
- [25] Gaudig G, Krebs M, Joosten H. *Sphagnum* growth under N saturation: interactive effects of water level and P or K fertilization. *Plant Biology*, 2020, 22(3): 394-403.
- [26] Campeau S, Rochefort L. *Sphagnum* regeneration on bare peat surfaces: field and greenhouse experiments. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(3): 599-608.
- [27] Bragazza L. *Sphagnum* niche diversification in two oligotrophic mires in the Southern Alps of Italy. *The Bryologist*, 1997, 100(4): 507-515.
- [28] Gorham E, Rochefort L. Peatland restoration: a brief assessment with special reference to *Sphagnum* bogs. *Wetlands Ecology and Management*, 2003, 11(1/2): 109-119.
- [29] Pouliot R, Hugron S, Rochefort L. *Sphagnum* farming: a long-term study on producing peat moss biomass sustainably. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 135-147.
- [30] Kämäräinen A, Jokinen K, Linden L. Adding *Sphagnum* to peat growing medium improves plant performance under water restricting conditions. *Mires and Peat*, 2020, 26: 13.
- [31] Regina K, Silvola J, Martikainen P J. Short-term effects of changing water table on N<sub>2</sub>O fluxes from peat monoliths from natural and drained boreal peatlands. *Global Change Biology*, 1999, 5(2): 183-189.
- [32] 胡雪凤. 干旱胁迫和种间竞争对两种泥炭藓生长和生理特征的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2018.
- [33] 刘正刚, 余冰, 尹丽, 胡庭兴. 2a 生希蒙得木幼苗对干旱胁迫的光合生理响应. *四川农业大学学报*, 2011, 29(2): 179-184.
- [34] 李媛, 程积民, 魏琳, 陈芙蓉. 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化. *生态学报*, 2013, 33(7): 2131-2138.
- [35] 肖石红, 张中瑞, 覃德华, 何东进, 刘进山, 吴建勤, 蔡昌棠, 游巍斌, 沈云强, 简立燕. 天宝岩国家级自然保护区 4 种类型泥炭藓沼泽植被组成及其与环境因子的关系. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 631-638.
- [36] 伊田, 梁东丽, 王松山, 吴雄平, 陈宏森. 不同种植年限对设施栽培土壤养分累积及其环境的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(7): 111-117.
- [37] 张阳武, 蔡体久, 赵天力, 刘斌, 李奕. 小兴安岭典型泥炭沼泽土壤水分物理性质研究. *森林工程*, 2009, 25(6): 10-14.
- [38] 管博, 栗云召, 夏江宝, 董洪芳, 吕振波, 于君宝. 黄河三角洲不同水位梯度下芦苇植被生态特征及其与环境因子相关关系. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2633-2639.
- [39] 庞喆, 王启龙. 不同灌溉量对土壤理化性质及水稻生长发育的影响. *灌溉排水学报*, 2019, 38(S2): 37-41.
- [40] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 孙波, 赵其国. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(1): 105-109.
- [41] Hamel C, Vujanovic V, Jeannotte R, Nakano-Hylander A, St-Arnaud M. Negative feedback on a perennial crop: fusarium crown and root rot of asparagus is related to changes in soil microbial community structure. *Plant and Soil*, 2005, 268(1): 75-87.
- [42] 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希. 氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性. *环境科学*, 2021, 42(1): 403-410.
- [43] 刘杨, 王小沁, 沈丹杰, 孙辉, 唐文英. 水分梯度下川西高寒湿地土壤酶活性变化特征. *四川农业大学学报*, 2019, 37(4): 517-524.
- [44] 靳振江, 颜秋梅, 吴森, 王家丽, 章俊, 顾中玮, 王晓彤. 龙脊稻作梯田休闲期的土壤水分、养分与酶活性特征. *桂林理工大学学报*, 2021: 1-8. [2021-08-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.N.20210330.1757.002.html>.
- [45] 王晓宇. pH 值及营养元素对泥炭藓属植物生长的影响. *贵州农业科学*, 2010, 38(7): 80-83.
- [46] Bartels S F, James R S, Caners R T, Macdonald S E. Depth-to-water mediates bryophyte response to harvesting in boreal forests. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(5): 1256-1266.
- [47] Soudzilovskaia N A, Graae B J, Douma J C, Grau O, Milbau A, Shevtsova A, Wolters L, Cornelissen J H C. How do bryophytes govern generative recruitment of vascular plants? *New Phytologist*, 2011, 190(4): 1019-1031.
- [48] Mulligan R C, Gignac L D. Bryophyte community structure in a boreal poor fen: reciprocal transplants. *Botany*, 2001, 79(4): 404-411.
- [49] Brust K, Krebs M, Wahren A, Gaudig G, Joosten H. The water balance of a *Sphagnum* farming site in north-west Germany. *Mires and Peat*, 2017, 20: 10.
- [50] 赵博超, 王雪婷, 苑喜男, 朱克松, 窦广玉, 刘刚, 王天宁, 王小虎, 潘涔轩. 一种提高农田中脲酶和磷酸酶含量的方法: 中国, CN109906703A, 2019-06-21.