

DOI: 10.5846/stxb202012103149

曾嘉, 陈槐, 刘建亮, 杨随庄, 严飞, 曹芹, 杨刚. 青藏高原泥炭地水位下降促进土壤碳积累的影响机制. 生态学报, 2022, 42(2): 625-634.

Zeng J, Chen H, Liu J L, Yang S Z, Yan F, Cao Q, Yang G. The decrease of peatland water table on the Qinghai-Tibet Plateau caused the increase of soil phenolic substances and vegetation biomass which promoted the accumulation of soil carbon. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 625-634.

青藏高原泥炭地水位下降促进土壤碳积累的影响机制

曾 嘉¹, 陈 槐^{2,3}, 刘建亮², 杨随庄¹, 严 飞¹, 曹 芹¹, 杨 刚^{1,*}

1 西南科技大学生命科学与工程学院, 绵阳 621000

2 中国科学院成都生物研究所, 山地生态修复与生物资源利用重点实验室; 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 成都 610041

3 中国科学院, 全球变化研究若尔盖生态站, 红原 624400

摘要: 酚类物质作为泥炭地重要的碳分解抑制剂, 植被作为泥炭地关键的碳输入来源, 它们在土壤碳(可溶性有机碳(DOC)等)周转过程中都发挥着重要作用。然而, 目前关于植被群落结构、酚类物质以及 DOC 含量对水位波动的响应存在较大争议。因此, 为明确泥炭地水位下降对植被群落结构、酚类物质以及 DOC 含量的影响并探明三者间的潜在联系, 以若尔盖高原泥炭地作为研究对象, 选取红原县日干乔地区 3 处不同地下水位泥炭地(水位由高到低依次为 S1(-1.9 cm)、S2(-10 cm)、S3(-19 cm)样地), 调查不同水位条件下植被群落结构特征, 并探究酚类物质及土壤碳含量对水位波动的响应。结果表明: (1) 从 S1 到 S3 样地水位下降促进土壤 DOC 显著增加($P<0.05$), 土壤总碳从 S1 到 S2 显著增加($P<0.05$), 而从 S2 到 S3 无显著差异; (2) 泥炭地水位下降促使禾本科(发草 *Deschampsia cespitosa*)、莎草科(木里薹草 *Carex muliensis*、乌拉草 *Carex meyeriana*) 植物大量出现, 植被群落高度显著增加($P<0.05$)。植被群落地上生物量由 153.67 g/m² 增加至 649.22 g/m², 地下生物量由 1067.52 g/m² 增加至 3424.78 g/m², 植物体地上地下部总酚分别增加 34.58% 和 13.17% ($P<0.05$)。这有可能促进植物输入更多碳进入土壤系统; (3) 随水位下降, 土壤总酚、水溶性酚以及多元酚分别增加 29.06%、542.87% 和 110.56% ($P<0.05$)。一元酚呈先增加后减少, 但总体仍表现为增加, 二元酚无明显变化; (4) 结构方程模型分析发现, 一元酚和多元酚能显著促进 DOC 和总碳积累 ($P<0.05$), 二元酚对 DOC 和总碳的积累影响不显著。以往的研究认为水位下降会加速碳流失, 但本研究发现这样的流失似乎被植物以及酚酸的作用所抵消。故此, 对泥炭地碳循环的研究应关注土壤-植物整个系统并考虑土壤中酚类物质的影响。

关键词: 泥炭地; 水位; 植被; 酚类物质; 可溶性有机碳

The decrease of peatland water table on the Qinghai-Tibet Plateau caused the increase of soil phenolic substances and vegetation biomass which promoted the accumulation of soil carbon

ZENG Jia¹, CHEN Huai^{2,3}, LIU Jianliang², YANG Suizhuang¹, YAN Fei¹, CAO Qin¹, YANG Gang^{1,*}

1 School of Life Sciences and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China

2 Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration Biodiversity Conservation, Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 Zoige Peatland and Global Change Research Station, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Hongyuan 624400, China

Abstract: Phenolic substances, as important carbon decomposition inhibitors in peatlands, and vegetation, as a key carbon input source in peatlands, play an important role in soil carbon (Dissolved organic carbon (DOC)) cycle. However, the response of vegetation community structure, phenolic substances and DOC content to water level fluctuations has been controversial. Therefore, in order to elucidate the effects of water table drawdown on vegetation community structure,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671244, 42077038); 四川省科技支撑项目(2020YFS0020)

收稿日期: 2020-12-10; **网络出版日期:** 2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanggang903@swust.edu.cn, yanggang903@163.com

phenolic substances and DOC content, and explore the potential relationship among them in peatland. Taking the Zoige Plateau peatland as the research object, three peatlands with different groundwater levels in Riganqiao of Hongyuan County were selected (The order of water table from high to low: S1 (-1.9 cm), S2 (-10 cm), S3 (-19 cm) sample plot). To explore the characteristics of vegetation community structure under different water tables and to explore the response of phenolic substances and soil carbon content to water table fluctuations. The results showed that: (1) The decrease of water table from S1 to S3 promoted the soil DOC to increase significantly ($P < 0.05$), and soil total carbon was significantly increased from S1 to S2 ($P < 0.05$), but had no significant difference from S2 to S3.; (2) The decrease of water table in peatland has led to the emergence of large amounts of Gramineae (*Deschampsia cespitosa*) and Cyperaceae (*Carex muliensis* and *Carex meyeriana*), and the height of vegetation community was significantly increased ($P < 0.05$). Aboveground biomass increased from 153.67 g/m² to 649.22 g/m² ($P < 0.05$), and underground biomass increased from 1067.52 g/m² to 3424.78 g/m² ($P < 0.05$). Total phenols in aboveground and underground parts of plants increased by 34.58% and 13.17%, respectively ($P < 0.05$). And this may promoted more plant carbon to enter the soil system. (3) With the decrease of water table, soil total phenols, water-soluble phenols and polyphenols increased by 29.06%, 542.87% and 110.56%, respectively ($P < 0.05$). The content of monophenol first increased and then decreased, but the overall content still showed an increasing trend, and the change of diphenol content was not obvious; (4) Structural equation model analysis shows that monophenol and polyphenols can significantly promote DOC and total carbon accumulation ($P < 0.05$), while diphenol had no significant effects on soil DOC and total carbon accumulation. Previous studies have shown that falling water table accelerate carbon losses, but this study found that this loss appears to be offset by the effects of plants and phenolic acids. Therefore, the study of carbon cycle in peatland should focus on the whole soil-plant system and consider the effect of phenolic substances in soil.

Key Words: peatland; water table; vegetation; phenolic substance; dissolved organic carbon

泥炭地作为重要的陆地生态系统,以不到 3% 的全球陆地面积储藏着约 1/3 的土壤碳^[1],近年来由于气候变化及人为活动改变水文条件,大量泥炭地退化甚至消失^[2]。这一过程中,大量土壤碳经微生物代谢分解以 CO₂、CH₄ 的形式进入大气环境^[3-4],或以可溶性有机碳(Dissolved organic carbon,简称 DOC)的形式经水文活动进入河流等其他生态系统^[5],最终导致泥炭地碳损失。然而,酚类化合物能通过抑制微生物活动和土壤酶活性减缓泥炭地碳分解^[6]。同时,植被作为重要的有机碳输入源^[7],对水位波动十分敏感^[8-9],在泥炭地碳循环过程中也起着极为关键的作用^[10]。可以看出,水位下降过程中,无论是 DOC、酚类化合物还是植被都是泥炭地碳循环过程中相当关键的一环^[11-12]。

植物通过根系及其凋落物分解调控 DOC^[13] 含量,酚类物质亦可抑制土壤有机碳(如 DOC 等)及凋落物分解,进而调控泥炭地碳循环。但目前 DOC、酚类物质和植被群落结构对水位波动的响应存在较大争议。(1) DOC 积累存在争议:Strack 和 Hribljan 等人^[3,14]认为低水位条件下,植物生物量增加,DOC 的净生产增加。而 Ellis 等人^[15]则认为水位下降导致分解增加,因此 DOC 浓度下降;(2) 酚类化合物积累存在较大争议:Bragazza 等人认为水位下降,促进维管植物生长,根系分泌物(酚酸等)增加,增加土壤酚类物质含量^[16-17]。然而,McAnallen 等^[18]认为维管束植物会导致氧气通过根系扩散到地下,促进酚氧化酶分解酚类物质,导致酚类物质减少。(3) 植被群落演替存在争议:一些研究认为水位下降会导致维管束植物入侵增加,植被生物量明显增加^[19];然而有研究学者^[20]认为高寒湿地土壤水分减少会导致植被生物量以及盖度高度明显下降^[21]。综上所述,可以看出 DOC、酚类物质和植被三者紧密联系,然而它们三者对泥炭地水位下降的响应如何及其过程中三者间存在怎样的协同关系尚未明确。

青藏高原主要位于中国西南部,介于北纬 26°—39°,东经 73°—104°之间。因其独特的气候和地理环境,形成大量湿地且分布较广。但目前该区域显著变暖且变暖趋势仍将持续^[22],打破了当地的地表水平衡,蒸发

量总体呈增加趋势,部分地区降雨减少^[23]。导致大面积泥炭草甸退化,温室气体排放增加^[24-25],因此该区域研究泥炭湿地具有重要意义。本研究选取位于青藏高原东部的红原县日干乔国家湿地自然保护区附近一斜坡面泥炭地(形成不同的地下水位)作为研究对象。旨在探讨以下问题:(1)DOC、酚类化合物及植被群落结构对水位下降的响应;(2)水位下降过程中酚类化合物及植被群落结构与DOC间存在怎样的响应关系?(3)三者间的联系对泥炭地碳循环的潜在影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验区域

位于红原县日干乔国家湿地自然保护区附近(图1),当地年平均温度为2.9℃(2018),较历史年均气温(1.4℃)有明显增加。实验区极端最高气温:24.6℃,极端最低气温:-22.8℃,年降水量:860.8 mm,平均海拔3507 m(数据来源于红原县人民政府 <http://www.hongyuan.gov.cn>)。该区域自1970年至今经历着持续的增温和降雨减少的影响^[26],水文变化导致大量泥炭湿地逐步退化甚至消失,且有大量研究显示青藏高原区域为重要的碳源,即使是在非生长季亦是如此。该区域泥炭土壤pH呈弱酸性或中性,主要优势物种为木里薹草 *Carex muliensis*、驴蹄草 *Caltha palustris*、节节草 *Equisetum ramosissimum*、龙胆 *Gentiana formosa* 和矮金莲花 *Trollius farreri* 等。

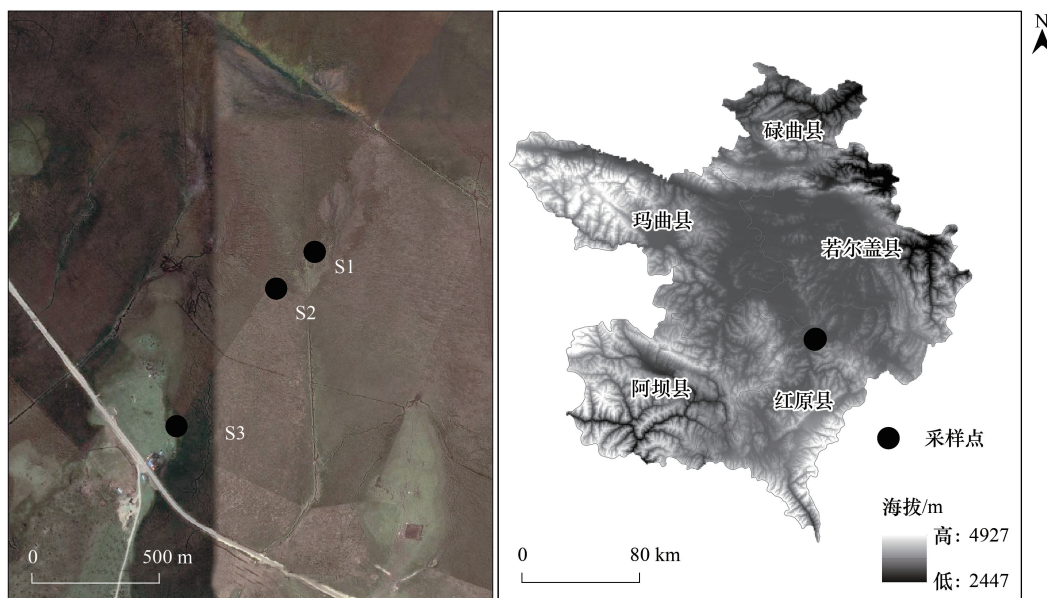


图1 实验地样地地理信息

Fig.1 Geographical information of the experimental site

S1:样地1 Site 1;S2:样地2 Site 2;S3:样地3 Site 3,三处不同地下水位泥炭样地

1.2 实验设计

实验选取一斜坡面的3处不同地下水位(年均水位依次为:-1.9、-10、-19 cm)泥炭地,依水位由高到低命名为S1、S2、S3三个样地,于生长季(8月)进行地表植被群落调查。在样地内按对角线法选取6个1 m×1 m的样方进行植被调查,记录样方内植物种类、丰富度、盖度、高度等信息,取完整地上植株和地下根系带回实验室烘干称重。在样方内用土钻取完整的泥炭土(0—30 cm)带回实验室,一部分用于测定DOC、总碳含量,另一部分用于测定酚类物质含量(每个样地6个重复)。

1.3 样品分析测定

DOC测定参考Jones等人^[27]的方法,取现场湿润土壤用2M KCL,在20℃下振荡提取1 h,土壤与溶液的

比例为 1:5 (10 g :50 mL)。总碳用总有机碳分析仪 (LIQUIL TOCII, Elementar, Germany) 进行测定。酚类物质测定分为总酚、水溶性酚、植物体总酚和酚酸测定。总酚、水溶性酚和植物体总酚测定采用 Folin-Ciocalteu 比色法^[28]; 酚酸测定: 取鲜土用 pH=7 的柠檬酸钠缓冲液提取, 经乙酸乙酯二次提取, 旋转蒸发浓缩。采用高效液相色谱 (HPLC, Agilent 1260 Infinity, Agilent Technologies) 对浓缩液进行分析^[29]。测定了没食子酸、龙胆酸、邻苯二酚、对羟基苯甲酸、4-香豆酸、丁香酸、水杨酸、咖啡酸、阿魏酸 9 种酚酸。

1.4 数据分析

所有的数据经直方图检验均服从正态分布和同质性, Bartlett 检验各样本方差齐性。采用单因素方差分析比较不同地下水位下土壤 DOC 含量、酚类物质含量及植被生物量等。采用线性回归分析不同地下水位土壤中总碳、DOC 含量与酚类物质含量及生物量间的关系。对所有回归变量都进行单因素筛查和共线性诊断, 并进行结构方程模型分析。采用 SPSS 22.0 以及 spssAU 进行数据分析; 用 Origin2019 绘图。

2 结果

2.1 泥炭地植被对地下水位的响应

水位波动下, 植被群落结构发生明显变化。对实验地不同地下水位泥炭地植被群落的调查发现, 水位降低显著改变地上优势种, 同时其植物生物量和总酚含量也存在显著差异 ($P<0.05$) (表 1)。此外, 水位的变化还显著影响群落高度, 由高水位下的 (15.96 ± 8.22) cm 增加到 (35.16 ± 13.64) cm, 大量植株个体较高的莎草科 (藁草 *Scirpus triqueter*) 和禾本科 (发草 *Deschampsia cespitosa*) 植物替代了三裂碱毛茛 (*Halerpestes tricuspis*) 等矮小植物。值得注意的是地下生物量与群落高度均在 S2 中出现峰值, 这与群落结构组成密切相关。调查过程中发现, S1 中主要集中一些小而矮的植物, 如三裂碱毛茛 (*Halerpestes tricuspis*)、荸荠 (*Heleocharis kamtschatica*) 等等; S2 中则主要为植株高度较高的植物, 但它们的个体数量仍然较少; S3 中有数量众多的植物, 不仅有个体较高的植物, 还有大量呈匍匐状生长的矮地榆 (*Sanguisorba filiformis*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*) 和山莓草 (*Sibbaldia procumbens*), 以及植株矮小的蓝白龙胆 (*Gentiana leucomelaena*) 和细茎驴蹄草 (*Caltha scaposa*)。综上, 说明水位下降促进植被群落结构变化, 促进莎草科和禾本科植物大量繁殖, 同时生物量、群落高度及植物体总酚也明显增加。

表 1 植被群落随水位变化
Table 1 Plant biomass and phenol concentration varied with water table

泥炭地 Peatland	优势物种 Dominant species	群落高度 Community height/cm	地上生物量 Aboveground biomass/ (g/m ²)	地下生物量 Belowground biomass/ (g/m ²)	地上部植物 总酚含量 TPA/ (mg/g)	地下部植物 总酚含量 TPB/ (mg/g)
S3	木里藁草 <i>Carex muliensis</i> 、发草 <i>Deschampsia cespitosa</i> 、藁草 <i>Scirpus triqueter</i>	35.16±13.64a	649.22±151.13a	3424.78±255.57b	31.72±1.30a	29.13±2.83a
S2	乌拉草 <i>Carex meyeriana</i> 、 节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	39.83±7.75a	392.14±77.67b	4564.79±884.97a	29.59±0.94b	30.17±0.96a
S1	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i> 、 三裂碱毛茛 <i>Halerpestes tricuspis</i>	15.95±8.22b	153.67±102.97c	1067.52±802.74c	23.57±1.62c	25.74±1.58b

S1: 样地 1 Site 1; S2: 样地 2 Site 2; S3: 样地 3 Site 3; TPA: 地上部植物总酚含量 Total phenols in the aboveground plants; TPB: 地下部植物总酚含量 Total phenols in the belowground plants; 不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)

2.2 土壤酚类物质和碳含量对地下水位的响应

酚类物质是缓解泥炭地有机碳分解的重要有机化合物, 其含量的变化直接影响泥炭地土壤碳动态。随泥炭地水位下降, 土壤酚酸总体呈现增加趋势。其中以多元酚 (没食子酸) 含量最高, 且随水位下降显著增加 ($P<0.05$)。二元酚含量随水位下降无明显变化, 一元酚在 S2 样地呈现出最高值, 总体趋势表现为随水位下降而增加 (图 2)。此外, 土壤水溶性酚和总酚含量也随水位下降呈现出显著上升趋势 ($P<0.05$) (图 3)。酚类物质含量增加在一定程度上会影响土壤碳分解。通过图 3 可以看出, 土壤 DOC 含量随水位下降显著增加。

土壤总碳在 S1 和 S2 间表现出显著差异 ($P<0.05$), S2 和 S3 间无显著差异, 总体呈现增加趋势。可以发现, 总酚和总碳的含量波动表现出一定的相似性。

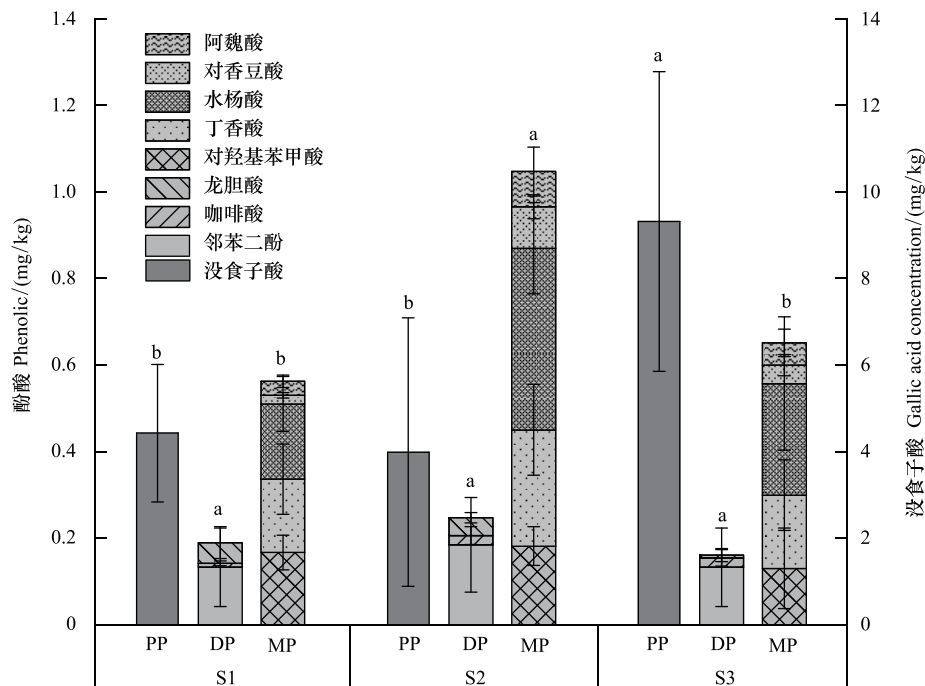


图2 酚酸随地下水水位下降的变化

Fig.2 Phenolic acid changes with the water table drawdown

PP:多元酚 Polyphenol; DP:二元酚 Diphenol; MP:一元酚 Monophenol; 不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)

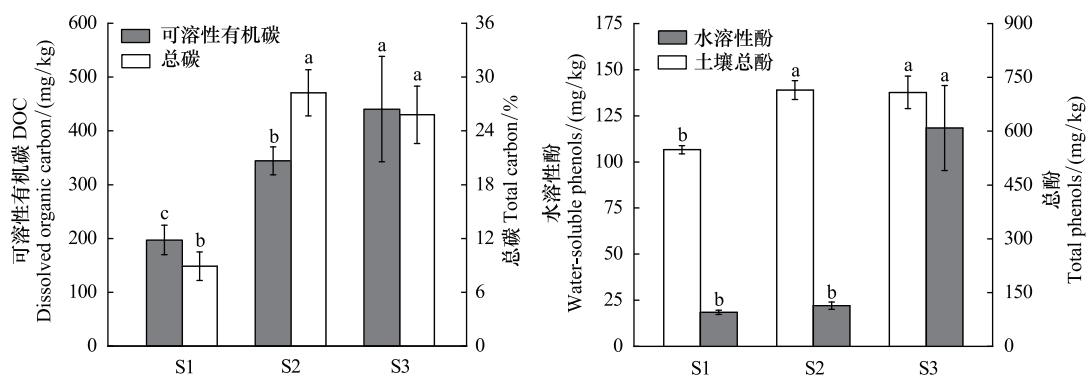


图3 土壤碳和酚随水位下降的变化

Fig.3 Soil carbon and phenols change with the water table drawdown

DOC:可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; 不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)

2.3 植被生物量及酚类物质影响土壤碳

从图4中可以发现, DOC浓度与地上生物量 ($R^2=0.69$)、土壤总碳含量与地上生物量 ($R^2=0.40$)、地下生物量 ($R^2=0.75$) 均呈现极显著正相关关系 ($P<0.01$), 且具有较高的拟合度。DOC浓度与地下生物量 ($R^2=0.35$) 也呈现显著正相关 ($P<0.05$)。此外植物体总酚(地上部和地下部)含量与DOC和土壤碳含量均呈现极显著正相关 ($P<0.01$)。说明植被群落与土壤碳含量间存在紧密联系, 植被生物量以及植物体总酚含量是调控土壤碳含量的可能原因。

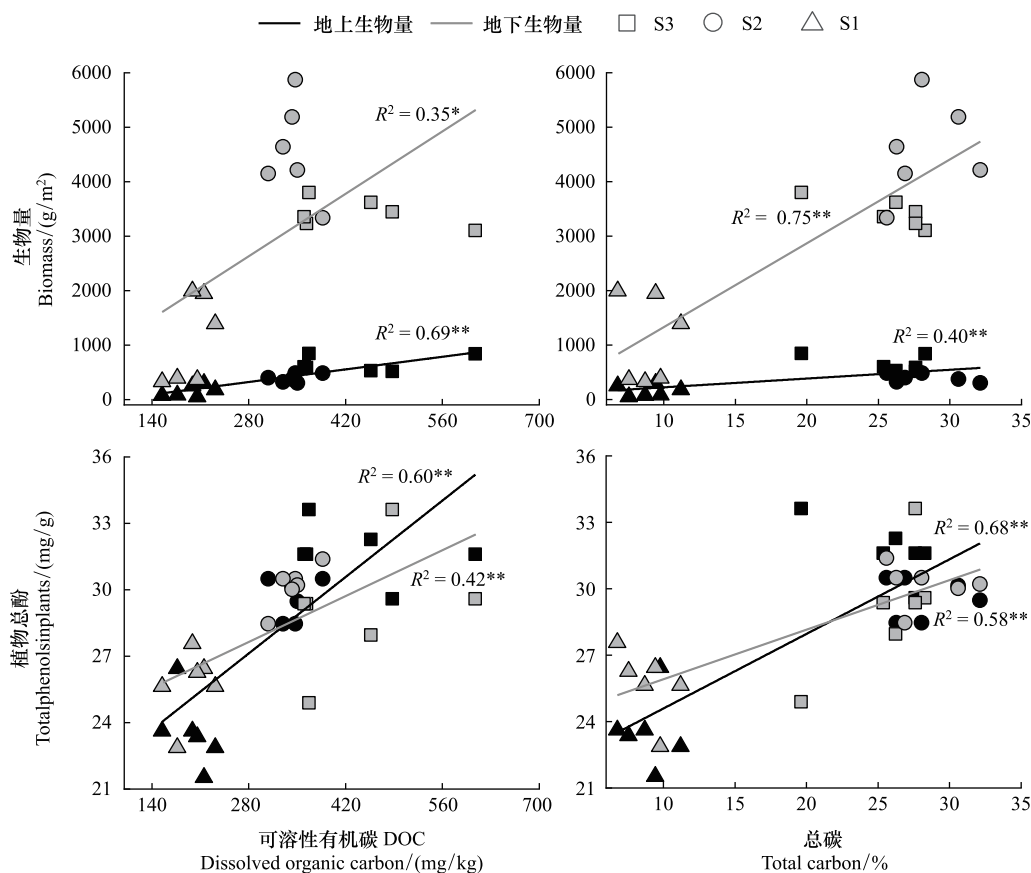


图4 植物生物量和总酚含量与土壤碳的回归分析

Fig.4 Regression analysis of plant biomass and total phenol content with soil carbon

灰色点和黑色点分别代表地下和地上生物量或地下和地上植物体总酚,灰色线段和黑色线段分别代表地下和地上生物量与土壤碳的拟合曲线或地下和地上植物体总酚与土壤碳的拟合曲线

水溶性酚酸是 DOC 的重要组成部分,研究发现水溶性酚与 DOC 呈极显著正相关关系 ($R^2 = 0.66$, $P < 0.01$),与总碳无显著相关关系(图 5)。总酚与 DOC ($R^2 = 0.81$) 和土壤总碳 ($R^2 = 0.90$) 均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。总酚不仅包括少量的简单酚酸,还包括大量复合态酚,都是土壤碳的重要组成部分,因此与土壤总碳在含量变化上呈现正相关关系。

2.4 不同酚酸对泥炭地碳的影响

可以看出土壤碳与酚类物质联系十分密切,但酚类物质依据其化学结构(酚羟基个数)的差异可以分为多元酚、二元酚、一元酚等。故此,为了探明不同酚酸对土壤碳的影响程度,及其水位下降对各变量的影响程度差异,采用多元线性回归模型对 DOC 进行分析,并建立结构方程模型(图 6)。发现水位能极显著的直接影 响 DOC 以及多元酚含量 ($P < 0.01$),对一元和二元酚含量无显著影响关系,且水位对一元酚和二元酚的解释度很小,说明影响一元和二元酚含量的主要因素并非水位。从结构方程模型中还可以清晰看出,一元酚和多元酚均能显著的直接影响土壤 DOC 含量,进而间接影响总碳。此外,一元、二元和多元酚酸间存在显著的影响关系,一元酚能极显著影响二元酚,而二元酚显著影响多元酚含量。通过总影响结果也可以发现,水位对土壤 DOC 和总碳的影响最大,且呈负向影响,即水位下降促进土壤 DOC 和总碳含量增加。除此之外,一元酚、多元酚都对土壤 DOC 和总碳有较大的正向影响效应。但二元酚与土壤 DOC 和总碳间无显著影响关系。总体而言,酚酸能对土壤碳产生一定的影响,特别是一元和多元酚的影响最为显著。

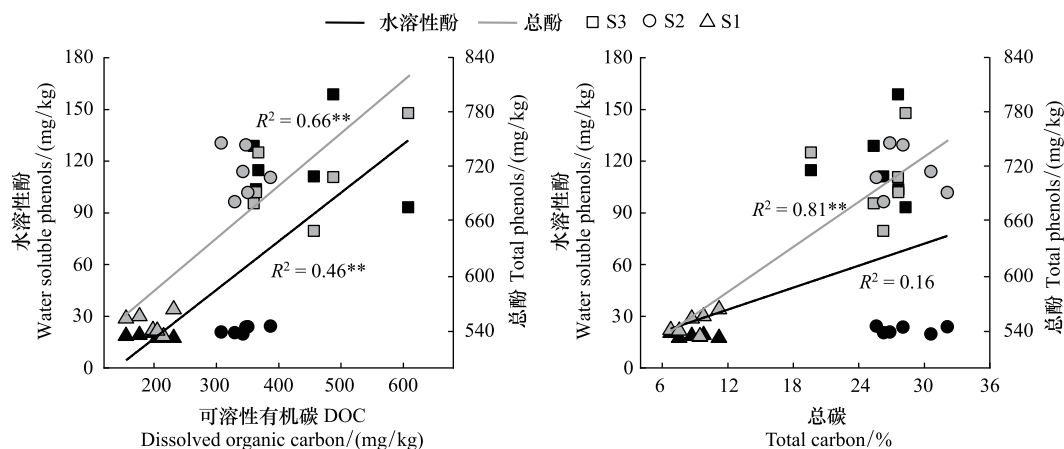


图5 土壤碳与酚类物质的回归分析

Fig.5 Regression analysis of soil carbon and phenolic substance

灰色点和黑色点分别代表总酚和水溶性酚,灰色线段和黑色线段分别代表总酚和水溶性酚与土壤碳的拟合曲线

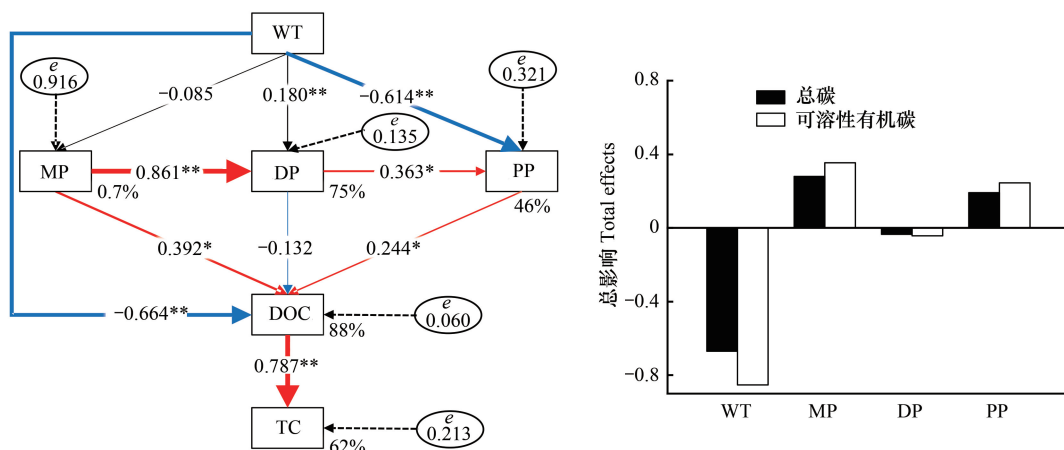


图6 泥炭地碳含量的结构方程模型

Fig.6 Structural equation model of carbon content in peatland

WT:水位 Water table;TC:总碳 Total carbon;红色和蓝色实线分别代表显著正向和负向影响,黑色实线代表无显著影响,e 代表剩余影响因子

3 讨论

3.1 泥炭地水位下降提高植物的碳输入能力

泥炭地地表植被作为泥炭地主要的碳源,植被群落结构改变对于泥炭地碳收支具有重要意义^[30-31]。通过线性回归模型也可以发现,随着水位下降,地上地下生物量都与土壤 DOC 和总碳呈现出较好的线性关系,其中地上生物量与 DOC ($R^2=0.69$)以及地下生物量与土壤总碳 ($R^2=0.75$)的线性回归拟合度均较高。大量研究发现,水位波动会改变土壤理化性质及其微环境,植物生长所需的养分、氧气和含水量等都发生改变。这将导致植物根茎叶生物量重新分配^[32],以及群落结构重组^[7,33]。本研究也发现,水位下降改变了植被群落组成,优势种发生明显的更替,这与 Weltzin 等人^[30]的研究结果一致。这种变化对生态系统的影响是十分明显的,群落结构的变化及生产力的改变会影响生态系统的营养结构和抗扰动能力^[34]。从植物生物量的角度也可以发现,植物生物量增加意味着有更多的凋落物和植物残体进入土壤系统,大量有机碳输入有利于维持泥

炭地碳收支平衡^[35]。植物地下生物量被认为是调节泥炭地碳循环的关键因子^[36],S2 具有较高的地下根系生物量,且 S2、S3 显著高于 S1(表 1),这与地下生物量和总碳的回归分析一致。说明地下生物量确实是影响土壤碳的重要因子。此外,水位下降增加了禾本科(如发草 *Deschampsia cespitosa* 等)和莎草科(如木里薹草 *Carex muliensis*、藙草 *Scirpus triqueter*)植物丰度。研究证实,禾本科和莎草科植物生长速度快并具有庞大的根系,能产生大量凋落物^[37–38],进而增加对土壤的碳输入。这样的变化似乎促进了碳循环^[17],使大量的土壤碳以植物为中间媒介,经植物代谢活动输入大气环境;同时植物以凋落物和根系分泌物的形式又向土壤输入大量有机碳(如 DOC 以及糖类等)^[17],便于微生物利用,在大气和土壤界面间加速循环。此前的研究已经发现水位下降促进 CO₂ 排放增加^[39],且增加了土壤总碳的含量^[40]。这是否意味着水位下降虽然增加了土壤碳分解^[39],但地表植被的碳输入弥补了这部分的损失。可以发现,水位下降对土壤碳和植物固碳的影响是截然不同的。土壤碳分解增加以及植物固碳增加之间需要更多的权衡,才能明确水位下降对泥炭生态系统碳储量的影响。这也让我们意识到泥炭碳储量的多少不仅仅关注土壤系统,而应该关注整个泥炭地生态系统。

3.2 酚酸利于土壤 DOC 积累

DOC 和酚类物质对水位的响应存在争议,本研究的结果认为水位下降显著增加了 DOC 和酚类物质含量,并且这种增加趋势可能主要受植物的影响。研究发现,水位下降促进泥炭地植物群落结构改变^[7,33],群落生物量^[19]以及植物体总酚含量明显增加,大量植物残体通过凋落物分解的形式向土壤系统输入大量有机质(如酚)^[16,41],这与土壤水溶性酚、总酚和酚酸含量增加的结果是吻合的。因此水位下降改变了植被结构、生物量以及生产力水平^[42],增加了植物向土壤输入酚类物质的能力。

水溶性酚和总酚与 DOC 均呈显著正相关关系(图 5)。对不同酚酸进行分析发现,一元酚和多元酚均能显著正向影响 DOC(图 6)。这说明诸如水溶性酚和一元、多元酚这样的简单酚能够对 DOC 的积累起到十分关键的作用。酚类物质促进 DOC 积累主要体现在三个方面:其一,较强的抗氧化性,抑制土壤有机碳氧化降解过程^[43]。其二,较强的生物毒性,能抑制微生物的代谢活动,减小对有机碳的代谢强度^[44–45]。其三,本身作为一种可溶性有机碳,其含量的增加,也会导致 DOC 积累。值得注意的是,二元酚对 DOC 无显著影响,这可能与整个水位下降过程中,二元酚含量一直维持在较为稳定的低含量有关。但结合水溶性酚和总酚与土壤 DOC 以及总碳的回归分析,还是可以看出,酚类物质对与土壤 DOC 固存具有十分显著的影响,进而显著影响到整个泥炭地的碳储量。此外,酚类物质作为植物体重要的次生代谢产物,在植物体中有着相当大的一部分占比,其含量由 23.57 到 31.72 mg/g 不等。植物以凋落物等形式将原本植物体的酚酸经降解作用进入土壤系统,进而增加土壤中酚酸含量,抑制一系列的土壤有机碳氧化分解过程,进而达到固定土壤有机碳的目的。

4 结论

(1) 泥炭地水位下降,土壤 DOC 和总碳含量显著增加。这与以往认为水位下降会导致土壤碳大量损失的结论存在一定分歧。说明水位对泥炭地碳含量的影响可能被其他因素所弥补,如:地表植被生物量、凋落物以及土壤酚酸含量和组成等等。

(2) 泥炭地水位下降促使植被群落结构改变,生物量显著增加,提高植物对泥炭地的碳输入能力。植物作为泥炭地重要的碳源,其群落结构及生物量改变,无论是从凋落物还是分泌物等方面,都会产生更多的有机质进入土壤系统。

(3) 水位下降促进酚类物质积累,能显著正向影响土壤 DOC 含量。酚类物质作为泥炭地重要的有机碳组成部分,具有较强的生物毒性和抗氧化性。其含量增加,对于稳固泥炭地有机碳具有显著的正向影响效应。

参考文献(References):

- [1] Dargie G C, Lewis S L, Lawson I T, Mitchard E T A, Page S E, Bocko Y E, Ifo S A. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 2017, 542(7639): 86–90.
- [2] Chen H, Yang G, Peng C H, Zhang Y, Zhu D, Zhu Q, Hu J, Wang M, Zhan W, Zhu E X, Bai Z Z, Li W, Wu N, Wang Y F, Gao Y H, Tian

- J Q, Kang X M, Zhao X Q, Wu J H. The carbon stock of alpine peatlands on the Qinghai-Tibetan Plateau during the Holocene and their future fate. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 95: 151-158.
- [3] Strack M, Waddington J M, Bourbonniere R A, Buckton E L, Shaw K, Whittington P, Price J S. Effect of water table drawdown on peatland dissolved organic carbon export and dynamics. *Hydrological Processes*, 2008, 22(17): 3373-3385.
- [4] 王冬雪, 高永恒, 安小娟, 王瑞, 谢青琰. 青藏高原高寒湿地温室气体释放对水位变化的响应. *草业学报*, 2016, 25(8): 27-35.
- [5] Wickland K P, Aiken G R, Butler K, Dornblaser M M, Spencer R G M, Striegl R G. Biodegradability of dissolved organic carbon in the Yukon River and its tributaries: seasonality and importance of inorganic nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(4): GB0E03.
- [6] 杨刚, 温晓荣, 白银萍, 芦静, 刘银占. 酚类物质对退化泥炭地碳输出的影响研究进展. *生态科学*, 2018, 37(2): 229-232.
- [7] 兰秀, 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 彭晚霞, 刘永贤, 范稚莲, 张家涌. 广西主要森林植被碳储量及其影响因素. *生态学报*, 2019, 39(6): 2043-2053.
- [8] 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.
- [9] Potvin L R, Kane E S, Chimner R A, Kolka R K, Lilleskov E A. Effects of water table position and plant functional group on plant community, aboveground production, and peat properties in a peatland mesocosm experiment (PEATcosm). *Plant and Soil*, 2015, 387(1/2): 277-294.
- [10] Walker T N, Garnett M H, Ward S E, Oakley S, Bardgett R D, Ostle N J. Vascular plants promote ancient peatland carbon loss with climate warming. *Global Change Biology*, 2016, 22(5): 1880-1889.
- [11] Goud E M, Moore T R, Roulet N T. Data from: Predicting peatland carbon fluxes from non-destructive plant traits. *Functional Ecology*, 2017, 31(9): 1824-1833.
- [12] Armstrong A, Holden J, Luxton K, Quinton J N. Multi-scale relationship between peatland vegetation type and dissolved organic carbon concentration. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 182-188.
- [13] Uselman S M, Qualls R G, Lilienfein J. Contribution of root vs. leaf litter to dissolved organic carbon leaching through soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1555-1563.
- [14] Hribljan J A, Kane E S, Pypker T G, Chimner R A. The effect of long-term water table manipulations on dissolved organic carbon dynamics in a poor fen peatland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(4): 577-595.
- [15] Ellis T, Hill P W, Fenner N, Williams G G, Godbold D, Freeman C. The interactive effects of elevated carbon dioxide and water table draw-down on carbon cycling in a Welsh ombrotrophic bog. *Ecological Engineering*, 2009, 35(6): 978-986.
- [16] Bragazza L, Parisod J, Buttler A, Bardgett R D. Biogeochemical plant-soil microbe feedback in response to climate warming. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 273-277.
- [17] Dieleman C M, Branfireun B A, Lindo Z. Northern peatland carbon dynamics driven by plant growth form — the role of graminoids. *Plant and Soil*, 2016, 415(1/2): 25-35.
- [18] McAnallen L, Doherty R, Donohue S, Kirmizakis P, Mendonça C. Combined use of geophysical and geochemical methods to assess areas of active, degrading and restored blanket bog. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 762-771.
- [19] Murphy M T, McKinley A, Moore T R. Variations in above- and below-ground vascular plant biomass and water table on a temperate ombrotrophic peatland. *Botany*, 2009, 87(9): 845-853.
- [20] Wu G L, Ren G H, Wang D, Shi Z H, Warrington D. Above- and below-ground response to soil water change in an alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 476: 120-127.
- [21] 吴鹏飞, 杨大星. 若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响. *生态学报*, 2011, 31(13): 3745-3757.
- [22] Bibi S, Wang L, Li X P, Zhou J, Chen D L, Yao T D. Climatic and associated cryospheric, biospheric, and hydrological changes on the Tibetan Plateau: a review. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(S1): e1-e17.
- [23] Yang K, Ye B S, Zhou D G, Wu B Y, Foken T, Qin J, Zhou Z Y. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2011, 109(3): 517-534.
- [24] 郭小伟, 戴黎聪, 李以康, 张法伟, 林丽, 李茜, 钱大文, 樊博, 柯浔, 舒铠, 朋措吉, 杜岩功, 曹广民. 不同退化程度下的高寒草甸主要温室气体通量. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 184-194, 209-209.
- [25] 张贤, 朱求安, 杨斌, 王洁仪, 陈槐, 彭长辉. 基于过程模型的青藏高原湿地甲烷排放格局评估. *生态学报*, 2020, 40(9): 3060-3071.
- [26] Yang G, Chen H, Wu N, Tian J Q, Peng C H, Zhu Q, Zhu D, He Y X, Zheng Q Y, Zhang C B. Effects of soil warming, rainfall reduction and water table level on CH₄ emissions from the Zoige peatland in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 83-89.
- [27] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 38(5): 991-999.
- [28] Kuiters A T, Denneman C A J. Water-soluble phenolic substances in soils under several coniferous and deciduous tree species. *Soil Biology and*

- Biochemistry, 1987, 19(6): 765-769.
- [29] 邹钰, 向武, 傅先芳, 李启立, 苏靖, 龚文, 王翰. 东北哈尼泥炭沼泽中酚酸的组成、酚铁相互作用及其环境意义. 地球科学, 2016, 41(4): 683-691.
- [30] Weltzin J F, Bridgham S D, Pastor J, Chen J Q, Harth C. Potential effects of warming and drying on peatland plant community composition. Global Change Biology, 2003, 9(2): 141-151.
- [31] Ward S E, Bardgett R D, Mcnamara N P, Ostle N J. Plant functional group identity influences short-term peatland ecosystem carbon flux: evidence from a plant removal experiment. Functional Ecology, 2009, 23(2): 454-462.
- [32] Murphy M T, Moore T R. Linking root production to aboveground plant characteristics and water table in a temperate bog. Plant and Soil, 2010, 336(1/2): 219-231.
- [33] Zeng J, Chen H, Bai Y P, Dong F Q, Peng C H, Yan F, Cao Q, Yang Z N, Yang S Z, Yang G. Water table drawdown increases plant biodiversity and soil polyphenol in the Zoige Plateau. Ecological Indicators, 2021, 121: 107118.
- [34] Weltzin J F, Pastor J, Harth C, Bridgham S D, Updegraff K, Chapin U C T. Response of bog and fen plant communities to warming and water-table manipulations. Ecology, 2000, 81(12): 3464-3478.
- [35] Bragazza L, Buttler A, Siegenthaler A, Mitchell E A D. Plant litter decomposition and nutrient release in peatlands//Baird A J, Belyea L R, Comas X, Reeve A S, Slater L D, eds. Carbon Cycling in Northern Peatlands. Washington, DC: American Geophysical Union, 2009: 99-100.
- [36] Juan-Ovejero R, Granjel R R, Ramil-Rego P, Briones M J I. The interplay between abiotic factors and below-ground biological interactions regulates carbon exports from peatlands. Geoderma, 2020, 368: 114313.
- [37] Basiliko N, Stewart H, Roulet N T, Moore T R. Do root exudates enhance peat decomposition? Geomicrobiology Journal, 2012, 29(4): 374-378.
- [38] Aerts R. Aboveground biomass and nutrient dynamics of *Calluna vulgaris* and *Molinia caerulea* in a dry heathland. Oikos, 1989, 56(1): 31-38.
- [39] Yang G, Wang M, Chen H, Liu L F, Wu N, Zhu D, Tian J Q, Peng C H, Zhu Q, He Y X. Responses of CO₂ emission and pore water DOC concentration to soil warming and water table drawdown in Zoige Peatlands. Atmospheric Environment, 2017, 152: 323-329.
- [40] Yang G, Tian J Q, Chen H, Jiang L, Zhan W, Hu J, Zhu E X, Peng C H, Zhu Q, Zhu D, He Y X, Li M X, Dong F Q. Peatland degradation reduces methanogens and methane emissions from surface to deep soils. Ecological Indicators, 2019, 106: 105488.
- [41] Dieleman C M, Branfireun B A, McLaughlin J W, Lindo Z. Enhanced carbon release under future climate conditions in a peatland mesocosm experiment: the role of phenolic compounds. Plant and Soil, 2016, 400(1/2): 81-91.
- [42] Hribljan J A. The Effect of Long-Term Water Table Manipulations on Vegetation, Pore Water, Substrate Quality, and Carbon Cycling in a Northern Poor Fen Peatland. Michigan: Michigan Technological University, 2012.
- [43] Rice-Evans C, Miller N, Paganga G. Antioxidant properties of phenolic compounds. Trends in Plant Science, 1997, 2(4): 152-159.
- [44] 李娟英, 高峰, 陈洁, 华寅, 彭自然, 王静. (2010). 酚类化合物对发光细菌的急性毒性和对 ETS 的抑制研究. 上海海洋大学学报, 2010, 19(1): 111-115.
- [45] Liu Y X, Li X, Cai K, Cai L T, Lu N, Shi J X. Identification of benzoic acid and 3-phenylpropanoic acid in tobacco root exudates and their role in the growth of rhizosphere microorganisms. Applied Soil Ecology, 2015, 93: 78-87.