

DOI: 10.5846/stxb201904090691

张广帅, 张全军, 于秀波, 闫吉顺, 赵全民, 蔡悦荫, 宫玮. 不同地下水位灰化藁草分解过程中木质素降解与碳、氮、磷释放的关系. 生态学报, 2020, 40(9): 3006-3015.

Zhang G S, Zhang Q J, Yu X B, Yan J S, Zhao Q M, Cai Y Y, Gong W. Correlations between lignin degradation and the C, N, P release during *Carex cinerascens* decomposition under different ground water level. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 3006-3015.

不同地下水位灰化藁草分解过程中木质素降解与碳、氮、磷释放的关系

张广帅^{1,2}, 张全军^{3,4}, 于秀波^{3,4,*}, 闫吉顺^{1,2}, 赵全民^{1,2}, 蔡悦荫^{1,2}, 宫 玮^{1,2}

1 国家海洋环境监测中心, 大连 116023

2 国家海洋局海域管理技术重点实验室, 大连 116023

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为研究湿地植物分解过程中木质素降解与碳、氮、磷元素释放之间的关系及其对不同地下水位环境梯度的响应, 在鄱阳湖典型碟形湖泊-白沙湖设置了 200 m×300 m 分解试验样地, 沿地下水位梯度划分 4 个试验样带(从湖岸到湖心依次为 GT-A, GT-B, GT-C, GT-D), 采用分解袋法模拟了典型湿地植物灰化藁草在不同地下水位环境的分解过程。结果表明, 分解 15 d 后, 地下水位的升高促进了木质素的降解和碳、氮、磷元素的释放; 在分解第 60—90 天, 碳、氮、磷元素的相对归还指数随着木质素分解速率的升高而显著增大, 并且相关性程度随着分解时间先增强, 后减弱; 分解过程中土壤 pH、含水量和微生物量碳、氮对木质素的降解和碳、氮、磷元素的归还具有显著的促进作用。研究结果将有助于深化对湿地植物分解和生物地球化学循环过程的认识, 为湿地自然保护区的科学有效管理提供理论依据。

关键词: 植物分解; 木质素; 元素释放; 地下水位梯度; 鄱阳湖

Correlations between lignin degradation and the C, N, P release during *Carex cinerascens* decomposition under different ground water level

ZHANG Guangshuai^{1,2}, ZHANG Quanjun^{3,4}, YU Xiubo^{3,4,*}, YAN Jishun^{1,2}, ZHAO Quanmin^{1,2}, CAI Yueyin^{1,2}, GONG Wei^{1,2}

1 National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

2 Key Laboratory of Sea Field Management Technology, State Oceanic Administration People's Republic of China, Dalian 116023, China

3 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: To reveal the relationship between lignin degradation and release of Carbon (C), Nitrogen (N), Phosphorus (P) and their response to the change of ground water level, a field experimental site with 200 m×300 m was setup in the beach of Baisha Lake, a typical shallow lake of Poyang Lake Wetlands. The site included 4 ground water levels: GT-A, GT-B, GT-C, and GT-D (moving from shore to center). Litter bag technique was applied to simulate the *Carex cinerascens* decomposition under different groundwater level gradients. The results showed that the rise of groundwater level promoted the lignin degradation and release of C, N, and P (CRRI, NRRI, PRRI) after 15 days' decomposition. The CRRI, NRRI,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471088); 国家海洋环境监测中心博士启动基金(2019-A-03)

收稿日期: 2019-04-09; **网络出版日期:** 2020-03-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxb@igsrr.ac.cn

and PRRI had significant positive correlations with lignin decay rates during 60—90 days, and the degree of these correlations increased for the first 60 days and then declined. Lignin degradation and the release of C, N, and P were influenced positively and consistently by soil pH, moisture, soil microbial biomass carbon, and soil microbial biomass nitrogen. This study provides useful insight for plant decomposition and biogeochemical processes of wetland ecosystem, and provides basis for the scientific management of the wetland nature reserves.

Key Words: litter decomposition; lignin; element release; groundwater level; Poyang Lake

植物分解是有机养分矿化的关键环节,是维持生态系统能量流动、物质循环和养分平衡的重要生态过程^[1]。湿地植物的分解会影响湿地生态系统的养分循环周期和湿地土壤肥力的可持续供给,进而通过影响植物的生长速率、发育水平、物种组成和分布格局等来影响植物种群间的关系和群落的构建^[2-3]。由于木质素在植物中的生物学作用主要是提高细胞壁的完整性和抵御病原体的攻击^[4],通常被认为是阻碍有机物进行生物过程分解的难分解物质^[5],其保护下的水溶性成分等易分解组分是制约分解速率的主要因素^[6],进而控制着植物分解过程^[7],因此,木质素的分解速率在很大程度上可以调节生态系统的碳通量变化和养分循环过程^[8]。最近的研究则发现,与陆地生态系统相比,湿地系统具有更强的木质素可分解性,在 0—60 天内木质素分解速率即可达到最大值^[9-10]。然而鲜有研究关注湿地植物分解过程中,木质素的降解对碳、氮、磷等营养元素释放的影响。

鄱阳湖是中国最大的淡水湖泊,同时也是世界上重要的季节性洪泛平原湿地^[11]。水位波动变化是鄱阳湖湿地生态系统结构和功能的重要调控因子^[12],不仅影响了湿地植物的生长和空间分布^[13],还会改变湿地植物分解、养分循环等生态过程,进而对湖泊水体环境产生深刻作用^[14-15]。鄱阳湖受长江和“五河”的双重影响,10 月份后逐渐退水,洲滩出露^[16],为以灰化藁草为代表的典型优势植物提供了适宜的生存环境,经过 2 个多月的秋季生长过程,藁草一般在 12 月开始枯萎,进入分解状态^[17],为鄱阳湖洲滩湿地提供了稳定的营养来源。作者前期对鄱阳湖湿地分解过程与地下水位变化的关系及其环境效应展开了系列研究^[18-20],而对分解过程中大分子物质降解和元素的释放关系研究尚有不足。此外,湿地洲滩植物衰亡凋落后的分解过程释放的营养元素会通过地表径流和地下水输送到水体,对湖泊水体产生明显的污染效应^[20],本研究的开展能够为湖区营养盐管控和水体富营养化监视监测提供重要的参考。本文以鄱阳湖典型碟形子湖白沙湖洲滩湿地优势植物灰化藁草的分解过程为研究对象,分析了木质素分解对碳、氮、磷元素释放的影响,以期为进一步理解湿地植物分解过程及湿地生物地球化学过程进而强化对鄱阳湖湿地生态系统的有效保护提供科学认识。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择位于鄱阳湖南矶山湿地国家级自然保护区内代表性碟形湖泊湿地—白沙湖为试验地(图 1)。该保护区位于鄱阳湖南部,地处赣江北支、中支和南支入湖冲击形成的三角洲前缘,海拔在 12—16 m,属亚热带暖湿型季风气候,夏季炎热多雨,冬季低温少雨,年平均降雨量为 1387—1795 mm,年最大降雨量为 2452.8 mm(1954 年),年最小降雨量为 1082.6 mm(1078 年),年平均蒸发量 800—1200 mm,多年平均气温 17.6℃,最冷月平均气温 5.1℃,最热月平均气温 29.5℃。受鄱阳湖季节性水文节律的影响,研究区湿地有明显的丰、枯水期,呈现出典型的水陆相交错变化:丰水期(4—9 月)除南山岛和矶山岛外其他洲滩均被洪水淹没;枯水期(10 月—次年 3 月)湖水消退归入河道和碟形洼地,不同高程洲滩相继出露,呈现河、湖、洲交错景观,发育有大量肥沃土壤和草洲,其中灰化藁草(*Carex cinerascens*)集中成片分布,遍及整个湿地草洲,盖度为 85%—100%。

1.2 试验设计与样品分析

研究样地面积为 200 m×300 m,由于灰化藁草分布面积最广,优势度最大,因此选择灰化藁草为分解实验

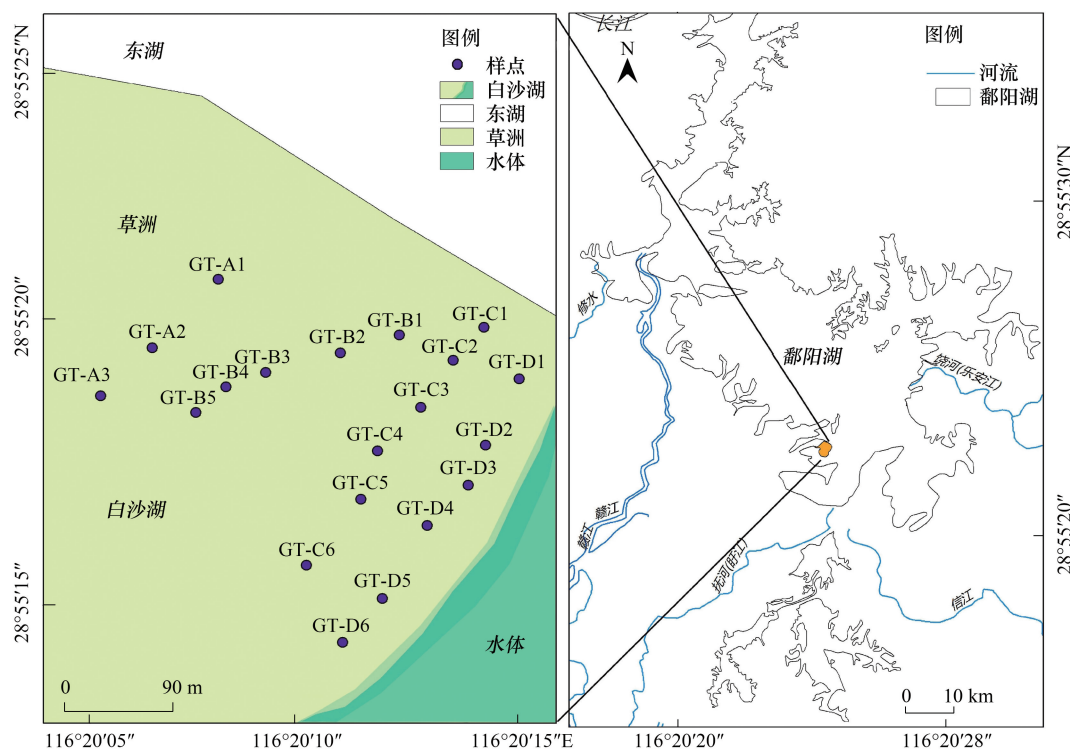


图1 研究区位置与样点布设

Fig.1 Location of the study area and sampling plots

GT-A:地下水位为-50—-25 cm的梯度带 Gradient of ground water level from -50 to -25 cm; GT-B:地下水位为-25—-15 cm的梯度带 Gradient of ground water level from -25 to -15 cm; GT-C:地下水位为-15—-5 cm的梯度带 Gradient of ground water level from -15 to -5 cm; GT-D:地下水位为-5—5 cm的梯度带 Gradient of ground water level from -5 to 5 cm

材料。为了确保研究结果的典型性和科学性,根据地下水位将研究区样地划分为4个梯度带,由湖岸到湖心的方向平行分布,依次为GT-A(-50—-25 cm),GT-B(-25—-15 cm),GT-C(-15—-5 cm),GT-D(-5—5 cm)(图1),相邻梯度带间距约100m。每个地下水位梯度带内根据微地形差异设置3—6个监测样点,共计20个分解试验监测点,每个样点插入内径为2cm的PVC管(绕管壁等距离钻取4个内径约3.5mm的小孔,埋入地下约70 cm,用铅垂线保证管壁与水平面垂直)用于测定地下水位,地下水位测量时间为2016年10月15日,11月15日,12月15日和2017年1月15日,每日9:00,13:00和16:00各测量一次,测量方法为用钢卷尺测量PVC管中水面与地表间的距离。具体方法参见文献^[21]。

分解实验采用尼龙网袋法。为避免分解袋中植物残体的非分解损失,同时保证不限制分解作用,选择了100目(0.15mm)、规格为15 cm×15 cm的网孔分解袋。2016年10月10日在远离水体的高地草洲上采集灰化藁草的成熟叶片,用去离子水冲洗后,剪成10 cm长的小段,置于60℃烘箱中烘干至恒重,每个分解袋中放入5.00 g烘干处理后的分解材料。将分解袋用竹竿固定在样点地表。分解试验开始于2016年10月15日,样品回收时间分别为试验开始后的第15、30、60、90、120天。分解袋带回实验室后,清除表面杂物并用去离子水冲洗干净后置于60℃烘箱中烘干至恒重,球磨仪研磨后测量其干物质质量、木质素含量以及碳、氮、磷元素含量。木质素的测定方法见文献^[22],碳、氮元素含量用元素分析仪(Elementar Vario Max CN; Hanau, 德国)测定,磷元素含量用钼锑抗比色法测定。

由于枯水期中期湿地洲滩不同地下水位土壤理化性质差异最为明显,而分解第60天植物分解过程受分解环境的影响最为显著^[18-19],因此分别于2016年12月即枯水期的中期和分解第60天左右进行分解试验监测点处的土壤样品采集。利用土钻(内径5 cm)对每个样点进行五点法混合取样,采集0—20 cm土壤样品约

500 g 装入聚乙烯自封袋内,编号后置于保温箱内运回实验室进行后续分析。土壤含水量采用烘干法测定,土壤容重(BD)采用环刀法测定,土壤 pH 采用水土比为 2.5:1 的 pH 计测定(Sartorius, 德国),土壤有机碳(TOC)采用重铬酸钾外加热法测定,土壤总氮(TN)采用元素分析仪测定(Elementar Vario Max CN; Hanau, 德国),土壤全磷(TP)采用钼锑抗比色法测定,土壤微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定。

1.3 数据处理与统计

灰化藁草分解过程中木质素的分解过程参数计算指标与方法为:

实测瞬时残留率(R_t)计算公式^[23]:

$$R_t = \frac{M_t \times L_t}{M_0 \times L_0} \times 100\%$$

式中, R_t 表示 t 时刻残留率, M_t 表示 t 时刻重量, L_t 表示 t 时刻木质素的浓度, M_0 表示初始重量, L_0 表示木质素的初始浓度, t 表示分解时间。

瞬时分解速率(k)用 Olson 负指数衰减模型^[24]计算:

$$M_t = M_0 e^{-kt}$$

式中, k 表示 t 时刻瞬时分解速率, k 值越大分解速度越快。 M_t 表示 t 时刻重量, M_0 表示初始重量, t 表示分解时间。

碳、氮、磷元素在分解过程中的相对养分归还指数(RRI, Relative return index)计算方法为^[23]:

$$RRI_t = \frac{M_0 \times C_0 - M_t \times C_t}{M_0 \times C_0} \times 100\%$$

式中, C_t 为 t 时刻某元素的浓度, C_0 为某元素的初始浓度, M_t 表示 t 时刻物质重量, M_0 表示初始物质重量。用 CRRI、NRRI 和 PRRI 分别表示碳的相对归还指数、氮的相对归还指数和磷的相对归还指数。

采用 SPSS 20.0 进行数据统计分析,采用单因素方差分析不同地下水位环境梯度下的木质素残留率,碳、氮、磷元素相对归还指数及土壤理化性质的变化,多重比较方法选择用 Dunnett's T3 比较检验,采用线性回归分析研究木质素分解速率与碳、氮、磷元素相对归还指数的关系,以及土壤木质素酶与碳、氮、磷含量的关系,采用 CANOCO(Canoco for Windows 5.0)进行冗余分析(RDA)研究土壤环境因子对木质素分解速率与碳、氮、磷元素相对归还指数的影响。制图选用 Origin lab Pro 8.0。

2 结果与分析

2.1 不同地下水位环境木质素分解过程

不同地下水位梯度木质素残存率随时间变化的方差分析表明(图 2),分解第 15 天,木质素残留率随地下水位梯度的升高而增大,分解第 30 天,不同地下水位梯度木质素分解残留率差异性显著($P>0.05$),而分解 30 d 后,木质素残留率随地下水位的升高而显著降低($P<0.05$)。不同地下水位梯度木质素分解速率随时间的变化均呈现先升高后降低的趋势(图 2)。低地下水位梯度(GT-A 和 GT-B)木质素分解速率的最大值出现在 15—30 d,高地下水位梯度(GT-C 和 GT-D)木质素分解速率的最大值出现在 30—60 d。分解初期(20 d 之前),木质素分解速率随着地下水位的升高而降低,而分解 30 d 以后,木质素分解速率随着地下水位的升高而升高。

2.2 不同地下水位环境碳、氮、磷释放过程

在整个分解过程中灰化藁草的碳、氮、磷元素都表现为净释放($RRI_s>0$;图 3)。不同地下水位梯度间,CRRI 在分解 60 d 之前和 120 d 均无显著性差异($P>0.05$),而 60 d—90 d 表现为 GT-D 显著高于其他梯度($P<0.05$);NRRI 随时间的变化与 CRRI 趋势相似,在分解 60 d 之前无显著性差异($P>0.05$),60 d—90 d 为 GT-D 显著高于其他梯度($P<0.05$),而分解第 120 天则又表现为 GT-A 显著高于 GT-C 和 GT-D($P<0.05$),而

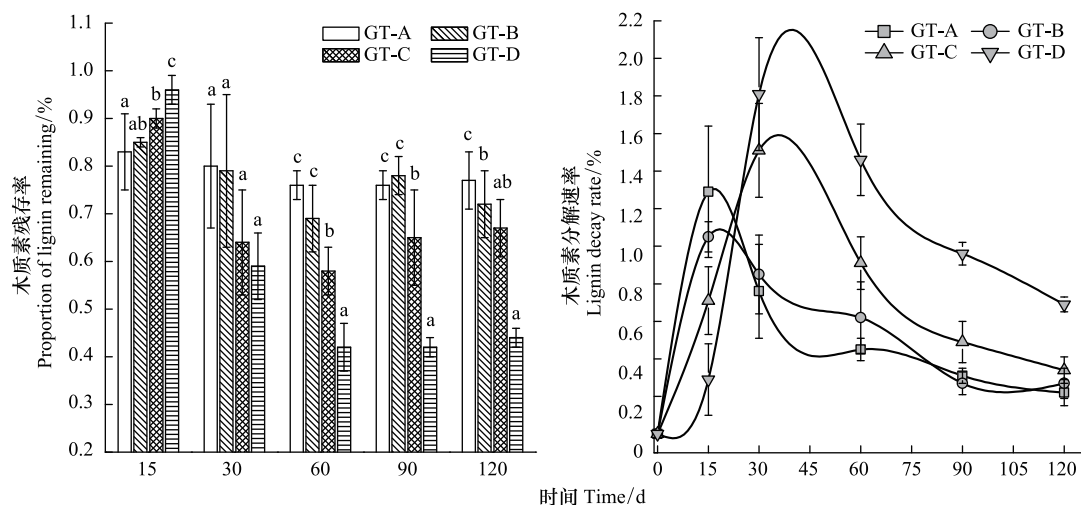


图2 灰化藁草分解过程中木质素残存率及分解速率动态变化

Fig.2 Proportion of lignin remaining and lignin decay rates in the litter bags of *Carex cinerascens*

不同小写字母表示在 0.05 水平上具有显著差异

GT-D 与其他地下水位梯度差异性不显著 ($P>0.05$); PRRI 则在整个分解过程中均为随着地下水位的升高而显著增大 ($P<0.05$)。随着分解时间的延长, CRRI 呈先升高后降低的趋势, 最高值出现在分解第 60 天; NRRI 呈上下波动变化; PRRI 则随着时间持续升高, 60 d 后趋于稳定。

2.3 木质素分解与碳、氮、磷释放的关系

碳、氮、磷元素相对归还指数与木质素分解速率的线性回归分析表明(图4), 分解 0—60 d, CRRI 和 NRRI 与木质素分解速率的正相关性逐渐增强, 分解 60 d 后相关性减弱, 分解第 60 天相关性显著程度最高 ($P<0.01$)。PRRI 在分解第 3 天随着木质素分解速率的增大而显著降低 ($P<0.01$), 分解 60 d 以后则随着木质素分解速率的增大而显著升高 ($P<0.05$)。

在分解第 60 天对应的洲滩出露中期, 随着地下水位的升高, 土壤 TOC、TN 和土壤容重均逐渐降低 ($P<0.05$), 土壤 TP 表现为 GT-D 显著低于其他地下水位梯度 ($P<0.05$), 而其他梯度间差异不显著 ($P>0.05$), 土壤 pH、含水量和土壤微生物量碳氮均随地下水位升高显著增大 ($P<0.05$); 微生物量碳、氮在 GT-D 显著高于其他地下水位梯度 ($P<0.05$)。

表1 不同地下水位环境土壤参数

Table 1 Soil properties along ground water level gradients

属性参数 Attribute parameter	GT-A	GT-B	GT-C	GT-D
有机碳 Total organic carbon/(g/kg)	1.30±0.02d	1.08±0.05c	0.57±0.04b	0.40±0.12a
总氮 Total nitrogen/(g/kg)	0.14±0.00d	0.11±0.01c	0.07±0.01b	0.04±0.01a
总磷 Total phosphorus/(mg/kg)	328.50±44.09b	341.13±64.03b	297.10±71.71b	269.47±34.96a
pH	4.62±0.11a	4.68±0.05a	4.86±0.07b	5.05±0.05c
含水量 Moisture/%	30.80±1.61a	33.93±2.82a	34.69±4.40a	40.90±4.21b
容重 Bulk density/(g/cm ³)	0.67±0.07c	0.57±0.04c	0.45±0.06b	0.31±0.12a
MBC/(mg/kg)	138.47±91.06a	173.19±52.65a	181.42±33.56a	390.32±71.32b
MBN/(mg/kg)	27.10±12.28a	28.35±6.18a	29.54±5.98a	116.41±39.54b

不同小写字母表示不同地下水位梯度间具有显著性差异 ($P<0.05$); GT-A: 地下水位为 -50—-25 cm 的梯度带 Gradient of ground water level from -50 to -25 cm; GT-B: 地下水位为 -25—-15 cm 的梯度带 Gradient of ground water level from -25 to -15 cm; GT-C: 地下水位为 -15—-5 cm 的梯度带 Gradient of ground water level from -15 to -5 cm; GT-D: 地下水位为 -5—5 cm 的梯度带 Gradient of ground water level from -5 to 5 cm; MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN: 微生物量氮 Microbial biomass nitrogen

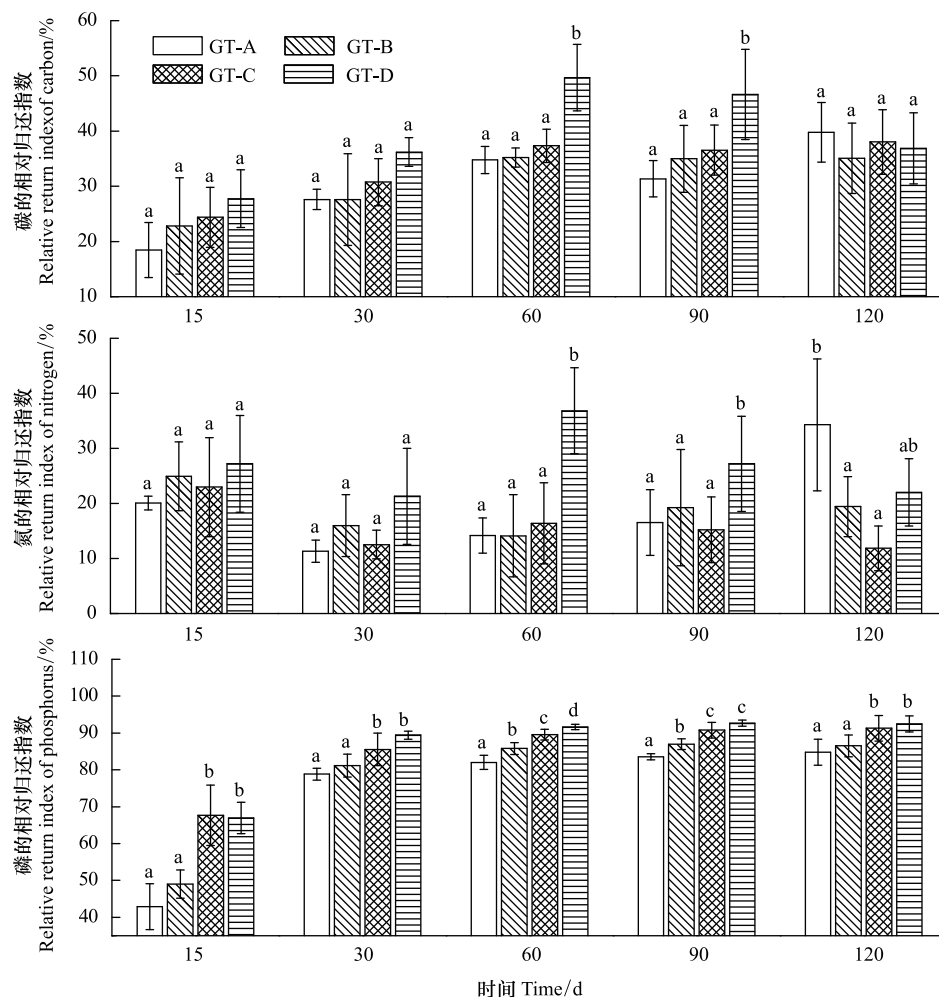


图3 灰化藁草分解过程中碳、氮、磷元素相对归还指数 (CRRI、NRRI、PRRI) 动态变化

Fig.3 Variation of CRRI, NRRI, PRRI during *Carex cinerascens* decomposition

CRRI: 碳的相对归还指数 Relative return index of carbon; NRRI: 氮的相对归还指数 Relative return index of nitrogen; PRRI: 磷的相对归还指数 Relative return index of phosphorus; 不同小写字母表示在 0.05 水平上具有显著差异

对分解第 60 天灰化藁草分解过程中所有地下水位带木质素分解速率及碳、氮、磷的相对归还指数进行冗余分析发现,前 2 个排序轴累积贡献值为 94.8%,其中第 1 排序轴解释了 99.3%的变异(图 5)。分解过程中,土壤环境因子对木质素分解速率及碳、氮、磷元素相对归还指数的作用一致。在所有环境因子中, Monte Carlo 检验表明,木质素分解速率及碳、氮、磷元素的相对归还指数与土壤含水量、pH 和微生物量碳、氮含量呈显著正相关性($P < 0.05$),而与土壤有机碳、全氮和土壤容重呈显著的负相关性($P < 0.05$)。总体上,在分解第 60 天,随着地下水位环境梯度升高,土壤含水量、pH 和土壤微生物量升高,土壤有机碳、全氮、容重含量降低,灰化藁草木质素分解速率降低,碳、氮、磷元素相对归还指数减少。

3 讨论

地下水位环境梯度和时间是影响植物分解过程的主要因素。在整个分解时间段,不同地下水位环境梯度灰化藁草木质素残存率、分解速率以及磷元素的相对归还指数均具有显著差异,且在干湿交替环境下的高地下水位梯度条件下木质素的分解程度和磷元素的归还程度最高。这说明,较高的地下水位和间歇性的淹没会通过促进微生物代谢水平和物质淋溶过程来增加植物的分解速率^[25]。Foulquier 等^[26]曾提出,较高的地下水

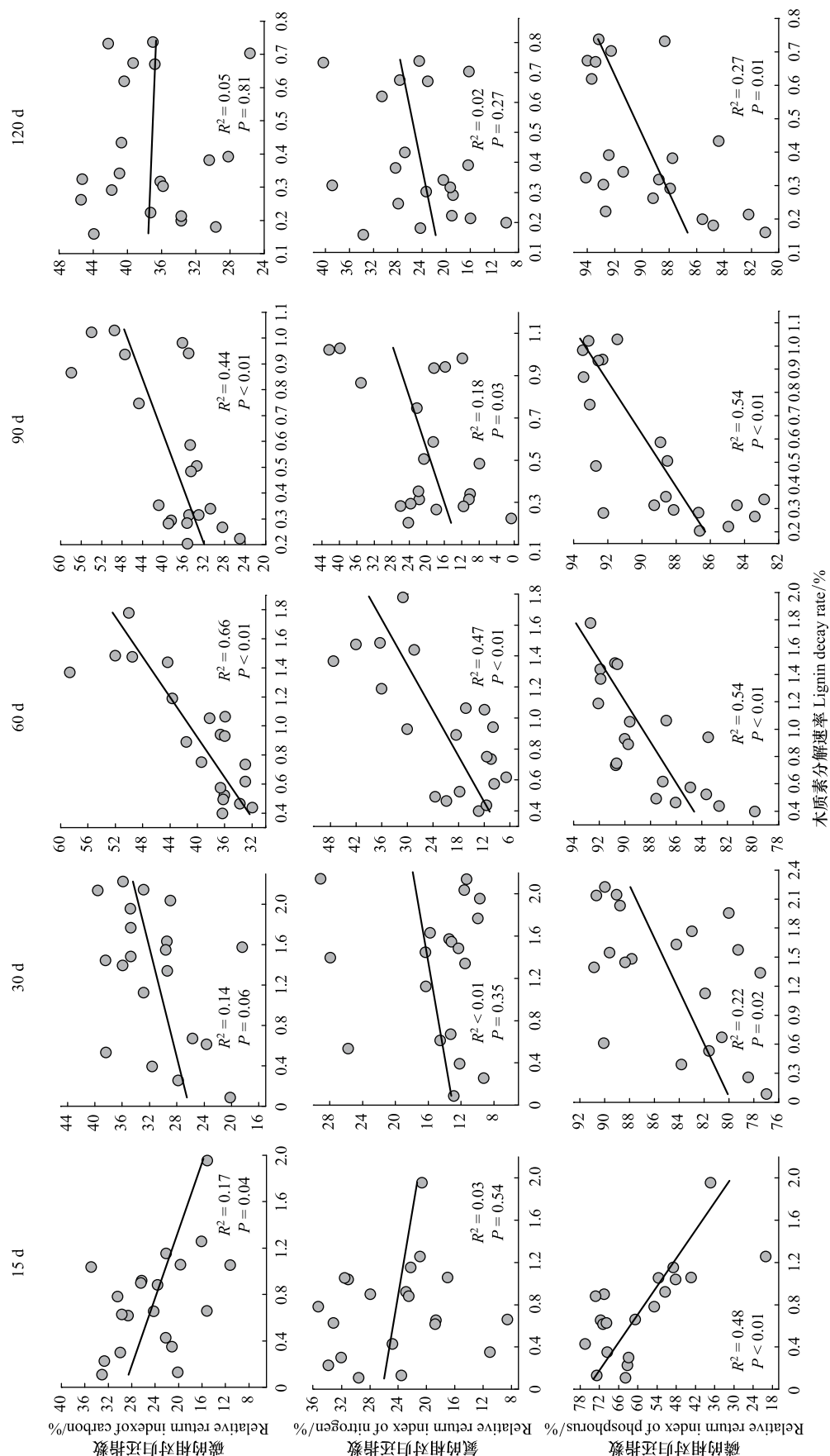


图 4 不同时间灰化蘆葦木质素分解速率与碳、氮、磷元素相对归还指数的关系
Fig. 4 Correlations between lignin decay rate and CRRI, NRRI, PRRI during different stages of *Carex cinerascens* decomposition

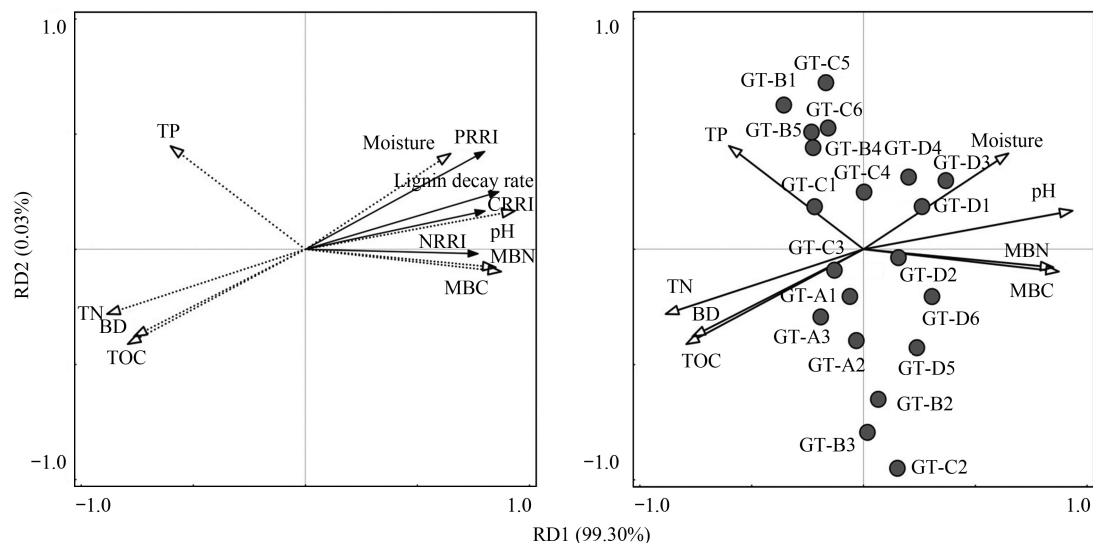


图5 不同环境梯度灰化藁草分解参数与土壤环境因子的 RDA 排序

Fig.5 Redundancy analysis (RDA) of lignin decay rate, CRRI, NRRI, PRRI constrained by soil properties along ground water level gradients during *Carex cinerascens* decomposition

RD: 冗余分析排序轴 Axis of redundancy analysis; RDA: 冗余分析 Redundancy analysis; TOC: 有机碳 Total organic carbon; TN: 总氮 Total nitrogen; TP: 总磷 Total phosphorus; BD: 容重 Bulk density; MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN: 微生物量氮 Microbial biomass nitrogen

位梯度能够为分解过程提供合适的微生态环境,因为适宜的土壤 pH,土壤质地以及土壤微生物群落会促进有机碳的可利用性和周转速率,进而直接影响有机质的分解过程^[27]。土壤微生物群落结构可能是影响植物分解过程中养分迁移转化和改变土壤生物、物理、化学进程的重要因素^[28-29]。

不同地下水位环境梯度间,有机碳和总氮的相对归还指数差异不显著,这主要是因为元素水平上,微生物在分解有机质的同时也会同化固定外界环境中的无机物,进而在分解残体中表现为元素的内外双向流动,而不是和木质素一样的单调减少^[30]。但是整体上在灰化藁草的分解过程中,木质素的分解速率与碳、氮、磷元素表现出一定的相关性,且相关程度与分解时间密切相关,在分解第 60—90 天相关性最强。相关研究表明,相对湿润环境下的分解过程中微生物作用在 30—90 天迅速增强^[31],并分泌出大量分解木质素的胞外酶^[32],说明在灰化藁草分解第 60—90 天内,木质素在强烈的微生物作用下快速分解为小分子的化合物^[4],这一时间段内有机碳的释放和归还主要来自于木质素的降解。在分解 0—30 d,由于有机碳和氮的释放主要靠糖类、低分子酚类等易分解物质^[33],因此碳、氮元素的相对归还指数与木质素分解速率相关性较弱。在分解 90 天后,由于在微生物的同化作用下,外部碳、氮元素富集程度升高,而内部碳、氮的释放速率减慢^[34],所以碳、氮元素相对归还指数与木质素相关性显著降低。Connin 等^[35]通过分析分解过程中 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化发现,早期分解过程以碳的释放为主,而分解后期外部碳元素开始逐渐富集。Oson 等^[36]研究发现,分解过程中磷元素的净释放量与木质素的净损失量具有显著的相关性,并且磷元素对木质素分解速率的敏感性比碳和氮更强,与本研究的结果一致,然而木质素降解对磷元素释放的影响机制至今尚不明确。总体上木质素分解速率与碳、氮、磷释放归还量变化的关系在一定程度上能够反映湿地植物分解阶段性差异。

本研究冗余分析表明分解过程中木质素分解速率与碳、氮、磷元素的相对归还指数对土壤环境因子的响应特征相同,进一步说明了木质素分解与碳、氮、磷元素的释放过程具有协同性。地下水位变化是影响土壤理化性质分异的主要原因^[37],湿地土壤在干湿交替条件下会产生土壤的膨胀和收缩,使土壤团聚体中有机质暴露,激发土壤微生物代谢活性,促进有机质的分解^[38]。本研究中不同地下水位梯度土壤在洲滩出露中期差异性显著。高地下水位梯度环境下,水体波动引起的冲刷和筛选及淋溶作用导致土壤胶体形态变化,引起土壤

pH、容重等性质的变化,使原来无法分解的有机质因团聚体崩溃而加速分解,因此土壤有机碳和全氮含量随着地下水位的升高而降低。洲滩出露中期,土壤微生物量碳氮均随着地下水位升高而显著增大,主要是因为土壤 pH 和含水量综合作用的结果^[37]。较高的地下水位梯度能够为分解过程提供合适的微生态环境,因为适宜的土壤含水量、pH 及土壤微生物活性的增强都会提高有机碳的可利用性和周转速率^[22],进而促进了木质素的分解和碳、氮、磷等元素的释放。

已有研究表明,木质素能通过提升土壤中水溶性磷等有效磷的含量来减少土壤对磷元素的固定^[39],并且土壤中木质素的降解与土壤碳、氮含量显著相关。本研究从湿地植物分解过程入手,揭示了木质素分解速率与碳、氮、磷元素释放的关系,尤其是分解 15 d 后,木质素的快速分解对磷元素的释放具有显著的促进作用,说明在土壤-植物系统中,木质素的含量及其分解过程对碳、氮、磷元素的迁移转化和生物地球化学循环具有重要的作用。然而,木质素如何通过影响元素的形态和转化来改变其在土壤及植物分解残体中的含量有待进步深入研究。

4 结论

地下水位环境梯度对灰化藁草分解过程中木质素分解速率受分解时间的影响,在分解第 15 天,木质素分解速率随地下水位升高而降低,15 d 后则随地下水位升高而显著升高,直至 90—120 d 后趋于稳定;地下水位升高显著加强了灰化藁草分解过程中碳、磷元素的相对归还指数,而氮元素相对归还指数在不同地下水位梯度间的差异不显著;在分解第 60—90 d,碳、氮、磷元素的相对归还指数随着木质素分解速率的增大而显著升高,在分解第 30 天,碳、磷元素的相对归还指数也与木质素分解速率具有显著正相关性。总体上碳、氮、磷元素相对归还指数与木质素分解速率的相关性随着分解时间先增强,后减弱;较高的地下水位梯度能够为分解过程提供了适宜的 pH、含水量及土壤微生物生物量等微生态环境条件,进而促进了木质素的降解和碳、氮、磷元素的释放和归还。

参考文献 (References):

- [1] Berg B, McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. 3rd ed. New York: Springer, 2014.
- [2] Xiong S J, Nilsson C. The effects of plant litter on vegetation: a meta-analysis. *Journal of Ecology*, 1999, 87(6): 984-994.
- [3] Wu S Q, He S B, Huang J C, Gu J Y, Zhou W L, Gao L. Decomposition of emergent aquatic plant (cattail) litter under different conditions and the influence on water quality. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(2): 70.
- [4] Brown M E, Chang M C. Exploring bacterial lignin degradation. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2014, 19: 1-7.
- [5] Williams C J, Yavitt J B. Botanical composition of peat and degree of peat decomposition in three temperate peatlands. *Écoscience*, 2003, 10(1): 85-95.
- [6] Berg B, McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. Heidelberg: Springer, 2013.
- [7] Berg B, Laskowski R. Litter fall. *Advances in Ecological Research*, 2005, 38(1): 19-71.
- [8] Schwarz W. The cellulosome and cellulose degradation by anaerobic bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, 56(5/6): 634-649.
- [9] Klotzbücher T, Kaiser K, Guggenberger G, Gatzek C, Kalbitz K. A new conceptual model for the fate of lignin in decomposing plant litter. *Ecology*, 2011, 92(5): 1052-1062.
- [10] Zhang G S, Yu X B, Gao Y, Li Y, Zhang Q J, Liu Y, Rao D D, Lin Y M, Xia S X. Effects of water table on cellulose and lignin degradation of *Carex cinerascens* in a large seasonal floodplain. *Journal of Freshwater Ecology*, 2017, 33(1): 311-325.
- [11] Finlayson M, Harris J, McCartney M, Young L, Chen Z. Report on Ramsar Visit to Poyang Lake Ramsar Site, P. R. China. 2010: 1-34.
- [12] Leira M, Cantonati M. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography. *Hydrobiologia*, 2008, 613(1): 171-184.
- [13] Wantzen K M, Rothhaupt K O, Mörtl M, Cantonati M, G.-Tóth L, Fischer P. Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue. *Hydrobiologia*, 2008, 613(1): 1-4.
- [14] 胡茂林, 吴志强, 刘引兰. 鄱阳湖湖口水位特性及其对水环境的影响. *水生态学杂志*, 2010, 3(1): 1-6.
- [15] 丁庆章, 刘学勤, 张晓可. 水位波动对长江中下游湖泊湖滨带底质环境的影响. *湖泊科学*, 2014, 26(3): 340-348.
- [16] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林, 陈伏生, 李述. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(6): 597-605.

- [17] 吴琴, 尧波, 朱丽丽, 幸瑞新, 胡启武. 鄱阳湖典型苔草湿地生物量季节变化及固碳功能评价. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2): 215-219.
- [18] Zhang G S, Yu X B, Xu J, Duan H L, Rafay L, Zhang Q J, Li Y, Liu Y, Xia S X. Effects of environmental variation on stable isotope abundances during typical seasonal floodplain dry season litter decomposition. Science of the Total Environment, 2018, 630: 1205-1215.
- [19] Zhang Q J, Zhang G S, Yu X B, J, Liu Y, Xia S X, Li Y, Hu B H, Wan S X. Effect of ground water level on the release of carbon, nitrogen and phosphorus during decomposition of *Carex cinerascens* Kükenth in the typical seasonal floodplain in dry season. Journal of Freshwater Ecology, 2019, 34(1): 305-322.
- [20] 张广帅, 于秀波, 刘宇, 张欢, 张全军, 李雅, 段后浪. 鄱阳湖碟形湖泊植物分解和水位变化对水体碳、氮浓度的叠加效应. 湖泊科学, 2018, 30(3): 668-679.
- [21] 李丽, 雷光春, 高俊琴, 吕偲, 周延, 贾亦飞, 杨萌, 索郎夺尔基. 地下水位和土壤含水量对若尔盖木里苔草沼泽甲烷排放通量的影响. 湿地科学, 2011, 9(2): 173-178.
- [22] Ziegler F, Kögel I, Zech W. Alteration of gymnosperm and angiosperm lignin during decomposition in forest humus layers. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 1986, 149(3): 323-331.
- [23] Zhao Q Q, Bai J H, Liu P P, Gao H F, Wang J J. Decomposition and carbon and nitrogen dynamics of *Phragmites australis* litter as affected by flooding periods in coastal wetlands. CLEAN-Soil, Air, Water, 2015, 43(3): 441-445.
- [24] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology, 1963, 44(2): 322-331.
- [25] Battle J M, Golladay S W. Hydroperiod influence on breakdown of leaf litter in cypress-gum wetlands. The American Midland Naturalist, 2001, 146(1): 128-145.
- [26] Foulquier A, Volat B, Neyra M, Bornette G, Montuelle B. Long-term impact of hydrological regime on structure and functions of microbial communities in riverine wetland sediments. FEMS Microbiology Ecology, 2013, 85(2): 211-226.
- [27] Peralta A L, Ludmer S, Matthews J W, Kent A D. Bacterial community response to changes in soil redox potential along a moisture gradient in restored wetlands. Ecological Engineering, 2014, 73: 246-253.
- [28] Balser T C, Firestone M K. Linking microbial community composition and soil processes in a California annual grassland and mixed-conifer forest. Biogeochemistry, 2005, 73(2): 395-415.
- [29] Waldrop M P, Firestone M K. Seasonal dynamics of microbial community composition and function in oak canopy and open grassland soils. Microbial Ecology, 2006, 52(3): 470-479.
- [30] Zhang Q J, Zhang G S, Yu X B, Liu Y, Xia S X, Ya L, Hu B H, Wan S X. Effect of ground water level on the release of carbon, nitrogen and phosphorus during decomposition of *Carex cinerascens* Kükenth in the typical seasonal floodplain in dry season. Journal of Freshwater Ecology, 2019, 34(1): 305-322.
- [31] Rejmánková E, Houdková K. Wetland plant decomposition under different nutrient conditions: what is more important, litter quality or site quality? Biogeochemistry, 2006, 80(3): 245-262.
- [32] Bugg T D, Ahmad M, Hardiman E M, Singh R. The emerging role for bacteria in lignin degradation and bio-product formation. Current Opinion in Biotechnology, 2011, 22(3): 394-400.
- [33] Prause J, López C F. Litter decomposition and lignin/cellulose and lignin/total nitrogen rates of leaves in four species of the Argentine Subtropical Forest. Agrochimica, 2007, 51(6): 294-300.
- [34] Gautam M K, Lee K S, Song B Y, Lee D, Bong Y S. Early-stage changes in natural ^{13}C and ^{15}N abundance and nutrient dynamics during different litter decomposition. Journal of Plant Research, 2016, 129(3): 463-476.
- [35] Connin S L, Feng X, Virginia R A. Isotopic discrimination during long-term decomposition in an arid land ecosystem. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(1): 41-51.
- [36] Osono T, Takeda H. Accumulation and release of nitrogen and phosphorus in relation to lignin decomposition in leaf litter of 14 tree species. Ecological Research, 2004, 19(6): 593-602.
- [37] 张广帅, 于秀波, 张全军, 李雅, 刘宇, 段后浪. 鄱阳湖湿地土壤微生物群落结构沿地下水位梯度分异特征. 生态学报, 2018, 38(11): 3825-3837.
- [38] 孟伟庆, 莫训强, 胡蓓蓓, 贺梦璇, 李洪远. 模拟干湿交替对湿地土壤呼吸及有机碳含量的影响. 土壤通报, 2015, 46(4): 910-915.
- [39] 陈倩, 穆环珍, 黄衍初, 杨问波. 木质素对土壤磷素形态转化及对磷有效性的影响. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 745-748.