

水体富营养化水平对纸莎草地下部化学成分的影响

肖双成^{1,2}, 谭宁华², 汤利¹, 宋卫武², 张玉梅^{2,4*}, 郑毅^{1,3*}

(1.云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2.中国科学院昆明植物研究所植物化学与西部植物资源持续利用国家重点实验室, 昆明 650201; 3.西南林业大学, 昆明 650224; 4.中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223)

摘要: 水体富营养化会导致纸莎草营养状况的变化及次生代谢产物含量的改变。通过典型样地采样和 HPLC 分析, 研究了亚热带高原季风区(昆明)受生活污水污染的沟渠中 3 种富营养化程度(超富营养-上游、富营养-中游、中富营养-下游)水质对纸莎草地下部生物量和化学成分的影响。结果表明: 自上游至下游随着水体富营养化程度的降低, 纸莎草地下部生物量显著下降, 纸莎草地下部生物量为 1.74~3.18 kg·m⁻², 与原产地相当甚至略高; 不同富营养化水质显著影响纸莎草地下部氮、磷的含量, 其中中游、下游氮的含量分别较上游下降了 43.5% 和 38.2%, 磷的含量分别下降了 16.2% 和 27.7%; 不同富营养化水质使纸莎草地下部化学成分发生了显著变化, 从上游到下游 1-芝麻脂素(38)的含量显著增加, 柳杉醇(40)的含量有增加的趋势, 黑麦草内酯(18)含量显著减小, 猫眼草黄素(35)和青蒿素(37)的含量受水质影响不大; 在未分离鉴定的化合物中, 还有 10 种化合物的含量随着水体富营养化程度的降低而显著增加, 有 2 种显著减少, 水质对其他化合物含量的影响不规律。

关键词: 富营养化; 纸莎草; HPLC; 化学成分

中图分类号: X171.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)11-2264-07 doi:10.11654/jaes.2013.11.023

Effects of Water Eutrophication on the Chemical Constituents of Underground Part of *Cyperus papyrus*

XIAO Shuang-cheng^{1,2}, TAN Ning-hua², TANG Li¹, SONG Wei-wu², ZHANG Yu-mei^{2,4*}, ZHENG Yi^{1,3*}

(1.College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2.State Key Laboratory of Phytochemistry and Plant Resources in West China, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201, China; 3.Southwest Forest University, Kunming 650224, China; 4.Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China)

Abstract: Water eutrophication could lead to the changes of *Cyperus papyrus* nutritional status and the secondary metabolites content. *C. papyrus* were sampled from upper to lower reaches of a ditch located in Kunming botanic garden, the water in the ditch were polluted by domestic sewage with different eutrophication levels, and the effects of water eutrophication on the biomass and chemical constituents of underground part of *Cyperus papyrus* were investigated with HPLC analysis. The results showed that the biomass of underground part of *C. papyrus* were significantly declined with the reduction of water eutrophication. The biomass of underground part of *C. papyrus* were 1.74 ~ 3.18 kg·m⁻², which is equal to or higher than that in its origin. The content of nitrogen and phosphorus of underground part of *C. papyrus* was significantly influenced by the water eutrophication degrees. Compared with the upper reaches, the contents of nitrogen in the middle reaches and lower reaches decreased 43.5% and 38.2% respectively, and the content of phosphorus decreased 16.2% and 27.7% respectively. The chemical constituents of underground part of *C. papyrus* changed dramatically with the eutrophication levels. From upper reaches to lower reaches, the content of 1-sesamin (38) increased significantly, the content of cryptomeridiol (40) trended to increase, the content of loliolide (18) decreased significantly, the content of chrysoplenetin (35) and artemetin (37) were not affected by water eutrophication. Furthermore, the other 10 unknown compounds increased significantly with the decrease of eutrophication, and 2 compounds decreased significantly with the decrease of eutrophication. The contents of the remaining compounds were irregular to the water quality.

Keywords: eutrophication; *Cyperus papyrus*; HPLC; chemical constituents

收稿日期: 2013-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(20972168, 30725048, 31260504); 国家新药创制重大专项(2011ZX09307-002-02); 云南省中青年学术技术带头人后备人才项目(2010CJ048)

作者简介: 肖双成(1976—), 男, 湖南洞口人, 硕士研究生, 主要从事土壤与环境化学方面的研究。E-mail: xiaoshch26@163.com

* 通信作者: 张玉梅 E-mail: zymeit@xtbg.ac.cn; 郑毅 E-mail: zhengyi-64@163.com

随着经济和城市化的迅速发展,水体富营养化趋势日益严重^[1]。而水生植物的存在可以提高水体净化的效率。它们不仅能吸收水体中的营养物质,为水中营养物质提供输出的渠道,而且其收获物还能产生附加经济价值,如可用作造纸、手工编织、生物燃料和制药材料等。

纸莎草[Cyperus papyrus]是莎草科莎草属植物,为一种多年生大型水生或湿生植物,生长于热带、亚热带的湿润地区,高可达 4~5 m;原产于尼罗河三角洲地区,是古埃及文明的重要组成部分。现今,纸莎草被培育、改良为水体景观植物^[2]。现有研究表明纸莎草能很好地去除污水中的 N、P、DOM 等,净化水体,缓解水体的富营养化。而且纸莎草是生物量最大的挺水植物之一^[3-4],因此纸莎草也常用在处理生活污水的人工湿地中^[5-7]。如 Fonkou 等研究表明,在水平表面流和水平潜流两种模式下,纸莎草对氨态氮和硝态氮均有较高的吸收率^[5];石雷等的研究表明纸莎草在各项水质指标(COD、BOD、TP、TN、NH₃-N 等)上均获得了较高的去除率^[7]。

目前国内外研究者已从莎草属的 16 种植物中分离出多种提取物或化合物^[8],这些物质的药理作用十分广泛,有对心血管系统的作用、对中枢神经系统的作用、对消化系统的作用、类雌激素作用等^[9-10]。而有关纸莎草化学和生物活性成分的研究仅限于糖类、甾醇、烷烃等简单成分上^[11],对其生物活性的研究也仅限于石油醚和醋酸盐提取物具有保肝护肝作用和抗氧化能力^[12]。植物的地下部不仅是作物吸收水分和养分的重要器官,也是氨基酸、激素等微量活性物质合成与转化的重要器官,近年来对地下部的研究日益受

到重视和关注^[13]。不同的富营养化水平下,纸莎草的营养状况不同,其体内各种代谢过程及次生代谢产物的含量也必然会受到影响,进而影响其药用价值。因此,本文以 3 个不同富营养化水平环境中生长的纸莎草为原料,初步研究其地下部化学成分变化,以期对纸莎草的合理开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于昆明植物园东园(N25.14,E102.75,海拔 1990 m),属中亚热带内陆高原季风气候,年平均气温 14.7℃;年均降雨量 1 035.3 mm,年均相对湿度 74%,年均日照 2 470.3 h。样品于 2012 年 8 月采于研究区内的一条沟渠,渠的源头来自昆明市黑龙潭和茨坝的生活污水。在渠中央种植有一排生长了 9 年的纸莎草。沟渠的水量不大,流速较缓。分别于渠的上游、中游、下游采集水样、土样、纸莎草植株样。各采样点相距 100 m 左右。土壤和水体的基本理化性状分别见表 1 和表 2。

表 2 为水体中养分的含量,在污水从上游往下游流动的过程中,由于纸莎草对水体中 N、P、DOM、K 等营养的吸收以及流水的冲洗、土壤吸附和降雨稀释等原因,使得水体的养分含量从上游到下游显著下降。水体富营养化程度基本符合上游>中游>下游,可分别划分为超富营养、富营养、中营养^[14]。

1.2 研究方法

取一份纸莎草地下部洗净,105℃杀青 30 min,70℃下烘干,称重后粉碎,测定其全量氮、磷、钾^[15];另取一份纸莎草地下部洗净,60℃下直接烘干,用于化学

表 1 采样点土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical-chemical characteristics of soil samples

处理	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	pH
上游	5.22±0.17a	2.11±0.23a	21.0±1.0a	148.7±6.8a	496±16a	36.7±1.1a	200±2a	7.61±0.07a
中游	3.96±0.12b	1.15±0.04b	20.0±1.0a	75.90±2.21b	361±9b	35.1±0.2a	192±2a	6.91±0.06b
下游	2.37±0.03c	0.98±0.06b	20.5±0.5a	70.08±2.53b	330±22b	15.0±0.7b	161±2b	6.97±0.11b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

表 2 采样点水体中养分的含量

Table 2 Nutrients concentration in the water samples

处理	总氮/mg·L ⁻¹	总磷/mg·L ⁻¹	总钾/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	DOC/mg·L ⁻¹	pH
上游	6.51±0.20a	0.698±0.0178a	6.69±0.32a	1.07±0.03a	1.75±0.10a	20.4±0.7a	7.96±0.00a
中游	2.82±0.09b	0.388±0.010b	5.39±0.32b	0.149±0.055b	1.31±0.07b	10.1±0.8b	7.62±0.02b
下游	1.45±0.07c	0.019 4±0.002c	3.61±0.16c	0.058 5±0.002 5c	0.750±0.029c	4.36±0.27c	7.81±0.07a

成分的测定;水样和土壤样品基本理化性质测定参照文献[15-17]。

植物化学成分的 HPLC 分析: 分别称取样品 1.000 0 g, 加入甲醇 50 mL, 60 ℃ 下回流 2 h, 冷却后过滤, 如此反复 5 次, 收集滤液。滤液用旋转蒸发器回收得到浸膏, 浸膏用色谱纯甲醇溶解, 转移到 10 mL 容量瓶中, 定容。溶液用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后, 用高效液相色谱仪(岛津 SIL-20A)分析样品的化学成分^[18]。

已知化合物的 HPLC 分析: 称取样品 0.000 5 g, 用色谱纯甲醇溶解, 转移到 10 mL 容量瓶中, 定容。溶液过滤后, 用高效液相色谱仪(岛津 SIL-20A)分析。

色谱条件: 色谱柱为 4.6×250 mm 的 Agilent 分析柱; 流动相为乙腈-水 (0~50 min, 乙腈比例为 5%~30%; 51~90 min, 乙腈比例为 30%~100%) 二元梯度洗脱; 检测波长为 205 nm; 进样量为 100 μL; 流速为 1 mL·min⁻¹; 柱温为 25 ℃; 记录时间为 90 min。所有 HPLC 的分析条件一致。

所有实验均重复两次, 所有数据均为两次结果的平均值, 数据采用 Excel 和 SPSS17.0 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 纸莎草地下部生物量的变化

纸莎草在 3 种富营养化水体中均可正常生长, 由表 3 可知, 自上游至下游, 随着水体富营养化程度的降低, 纸莎草地下部生物量有下降的趋势, 其中下游的生物量较上游和中游都呈显著下降, 分别下降了 45.2% 和 37.9%。这说明水体不同富营养化程度会影响纸莎草地下部的生长发育。

表 3 纸莎草地下部生物量变化

Table 3 Biomass of the underground part of *C. papyrus*

处理	上游	中游	下游
生物量/g·株 ⁻¹	31.80±2.18a	28.05±5.29a	17.43±1.88b

2.2 纸莎草地下部营养元素含量及其累计量的变化

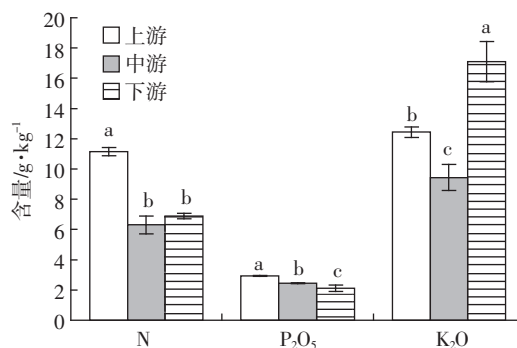
由图 1 可知, 随着水体富营养化程度的降低, 纸莎草地下部氮的含量自上游至下游有下降的趋势, 且中游和下游氮含量较上游都显著下降, 分别下降了 43.5% 和 38.2%; 地下部磷的含量都呈显著性下降, 其中中游磷含量较上游下降了 16.2%, 下游较上游下降了 27.7%; 而地下部钾的含量却没有下降的趋势, 中游较上游显著性下降了 24.1%, 而下游较上游反而显著性增加, 这可能是上、中游水体富营养化程度较重, 导致纸莎草地下部长势较下游好, 对钾存在生物稀释

效应的原因。从植物地下部氮、磷、钾三元素的含量来看, 总体表现为钾(K₂O)>氮(N)>磷(P₂O₅), 其中钾的平均含量为(12.99±3.86)g·kg⁻¹, 氮为(8.12±2.65)g·kg⁻¹, 磷为(2.49±0.41)g·kg⁻¹。

图 2 为纸莎草地下部对 N、P、K 累积量的变化, 由图 2 可知纸莎草地下部氮、磷的累积量自上游至下游, 都随水体富营养化程度的降低呈显著下降。其中中游氮的累积量较上游下降了 51.0%, 下游较上游下降了 66.0%; 磷的累积量分别下降了 26.2%、60.8%; 钾的累积量有下降的趋势, 但只有中、下游与上游相比呈显著下降, 分别下降了 34.1% 和 25.1%。从植物地下部对氮、磷、钾三元素的累积量来看, 总体表现为钾(K₂O)>氮(N)>磷(P₂O₅), 其中钾的平均累积量为(0.317±0.070)g·株⁻¹, 氮为(0.216±0.122)g·株⁻¹, 磷为(0.066±0.028)g·株⁻¹。

2.3 纸莎草地下部化学成分的变化

以上游纸莎草地下部中 4 号峰的积分面积为



不同小写字母表示同种养分不同富营养程度间有显著差异($P < 0.05$), 下同

图 1 纸莎草地下部营养元素含量的变化

Figure 1 Nutrient element concentration in underground part of *C. papyrus*

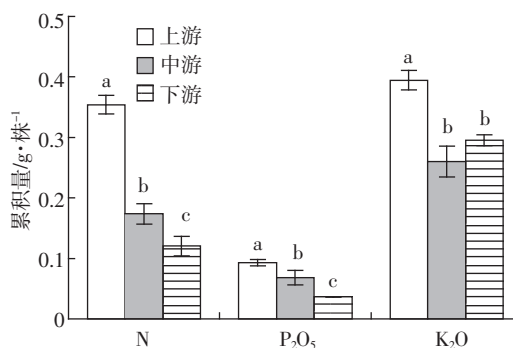


图 2 纸莎草地下部营养元素的累积量变化

Figure 2 Accumulation of nutrients in underground part of *C. papyrus*

1.00, 计算上、中、下游纸莎草地下部中的主要共有峰的相对峰面积, 其结果见表 4。图 3、图 4、图 5 为上、中、下游纸莎草地下部的 HPLC 图谱, 比较 3 张图谱, 再结合表 4 主要峰峰面积的统计数据可知 4、5、6、7、10、12、14、22、27、30、38 号峰 11 种化合物从上游到下游都显著增加, 而 18、42、45 号峰 3 种化合物显著减少。4 号峰峰面积中游比上游增加了 183.6%, 下游比上游增加了 464.2%; 5 号峰分别增加了 102.6%、358.1%; 6 号峰分别增加了 273.6%、907.7%; 7 号峰分别增加了 174.9%、373.5%; 10 号峰分别增加了 101.2%、276.5%; 12 号峰分别增加了 74.1%、220.1%; 14 号峰分别增加了 100.7%、271.7%; 22 号峰分别增加了 1 088.4%、1 263.3%; 27 号峰分别增加

了 556.6%、832.1%; 30 号峰分别增加了 1 831.2%、7 389.9%; 38 号峰分别增加了 58.4%、426.6%; 18 号峰分别减少了 34.2%、65.4%; 42 号峰分别减少了 14.7%、36.7%; 45 号峰分别减少了 59.3%、94.2%; 35、37 号峰峰面积受水质影响变化不大; 其他峰峰面积的变化不规律。

2.4 单体化合物 HPLC 图谱

表 5 为从纸莎草中分离得到的化合物的 HPLC 图谱的相对峰面积, 表中所标相对峰面积为 5 μg 化合物 (计算所得) 的相对峰面积, 化合物的具体结构见图 6。由保留时间可知 18 号峰为黑麦草内酯 (Lololide), 有研究表明内酯类化合物有一系列的生物活性, 如抗肿瘤活性等^[9]; 35 号峰为猫眼草黄素

表 4 不同富营养化水平下纸莎草地下部 20 个主要峰的相对峰面积

Table 4 Relative area of 20 common peaks of *C. papyrus* underground part from different eutrophication levels

峰编号	处理	保留时间/min	相对峰面积	峰编号	处理	保留时间/min	相对峰面积
4	上游	9.11±0.05	1.00±0.05c	22	上游	38.45±0.01	3.68±0.03c
	中游	9.62±0.03	2.84±0.11b		中游	38.26±0.04	43.73±2.81b
	下游	9.32±0.18	5.64±0.27a		下游	38.11±0.08	50.16±3.00a
5	上游	11.55±0.02	4.62±0.31c	27	上游	51.17±0.29	3.92±0.01c
	中游	10.90±0.38	9.37±0.91b		中游	50.61±0.29	25.73±1.71b
	下游	11.05±0.13	21.17±0.03a		下游	50.79±0.07	36.52±1.38a
6	上游	12.50±0.27	0.95±0.23c	30	上游	57.78±0.00	0.80±0.07c
	中游	12.08±0.03	3.54±0.69b		中游	58.27±0.43	15.52±3.88b
	下游	12.31±0.30	9.54±0.16a		下游	58.80±0.03	60.21±0.98a
7	上游	13.35±0.12	3.58±0.09c	35	上游	65.46±0.00	0.53±0.03a
	中游	13.68±0.04	9.85±1.37b		中游	65.81±0.13	0.57±0.02a
	下游	13.37±0.13	16.97±0.64a		下游	65.35±0.30	0.57±0.02a
8	上游	17.25±0.02	13.99±0.71b	37	上游	68.75±0.13	0.33±0.02a
	中游	16.68±0.31	40.03±2.90a		中游	67.96±0.00	0.35±0.01a
	下游	16.87±0.13	33.74±2.39a		下游	67.21±0.00	0.34±0.03a
9	上游	18.43±0.02	14.54±0.55c	38	上游	70.11±0.06	0.70±0.04c
	中游	17.83±0.33	45.37±2.39a		中游	69.71±0.30	1.10±0.12b
	下游	18.02±0.14	34.78±1.64b		下游	70.07±0.03	3.66±0.11a
10	上游	19.79±0.03	13.32±0.52c	40	上游	75.27±0.00	3.30±0.00b
	中游	19.16±0.35	26.79±1.42b		中游	75.22±0.03	3.18±0.04b
	下游	19.37±0.15	50.14±1.40a		下游	75.21±0.01	5.68±0.36a
12	上游	23.43±0.02	9.46±0.45c	42	上游	76.66±0.13	0.21±0.00a
	中游	23.84±0.13	13.45±0.25b		中游	76.49±0.03	0.18±0.01b
	下游	23.27±0.10	30.30±2.35a		下游	76.51±0.01	0.13±0.00c
14	上游	23.69±0.28	8.15±0.87c	45	上游	82.53±0.12	2.97±0.04a
	中游	24.49±0.14	16.36±1.87b		中游	82.39±0.01	1.21±0.03b
	下游	23.52±0.15	30.30±2.35a		下游	81.95±0.03	0.17±0.02c
18	上游	29.64±0.20	0.37±0.03a	46	上游	82.41±0.00	3.03±0.02a
	中游	29.54±0.32	0.24±0.02b		中游	82.32±0.06	1.15±0.03c
	下游	29.76±0.10	0.13±0.00c		下游	82.32±0.02	1.88±0.00b

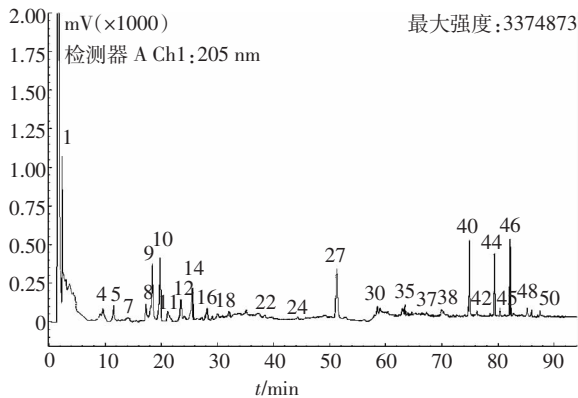


图 3 上游地下部 HPLC 图谱

Figure 3 HPLC spectrogram of *C. papyrus* underground part in upper reaches

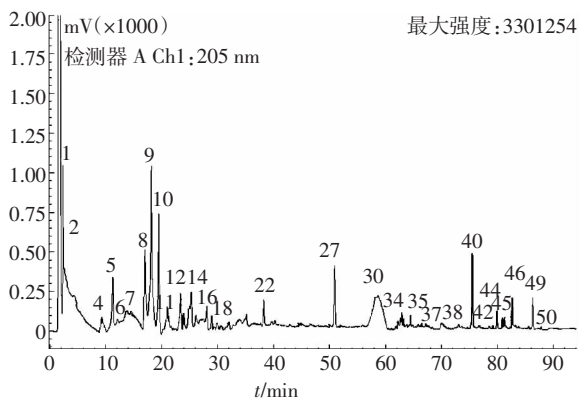


图 4 中游地下部 HPLC 图谱

Figure 4 HPLC spectrogram of *C. papyrus* underground part in middle reaches

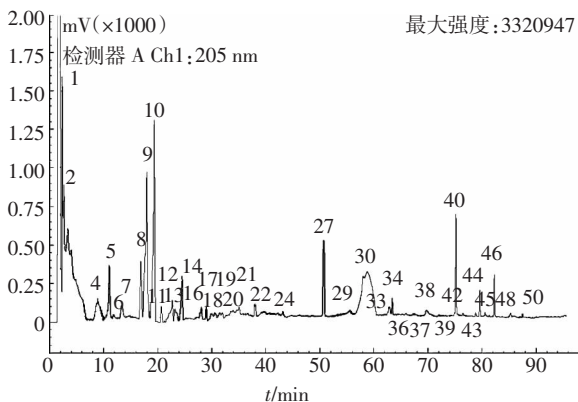


图 5 下游地下部 HPLC 图谱

Figure 5 HPLC spectrogram of *C. papyrus* underground part in lower reaches

(Chrysoplenetin), 37 号峰为青蒿亭 (Artemetin), 其均为多甲氧基黄酮(PMFs), 现代药理研究证实, PMFs 具有抗病原微生物、抗诱变、抗血小板聚集、抗癌、抗炎、神经保护、预防心脑血管疾病等方面的药理活性^[20]; 38

表 5 已提纯的化合物的相对峰面积

Table 5 Relative peak area of compounds purified from *C. papyrus*

化合物峰号	化合物名称	保留时间/min	相对峰面积
18	黑麦草内酯	29.56±0.82	8.81±0.10
35	猫眼草黄素	65.44±0.00	6.21±0.03
37	青蒿亭	68.78±0.07	26.59±0.20
38	1-芝麻脂素	70.01±0.00	7.52±0.51
40	柳杉醇	75.34±0.02	2.64±0.12

号峰为 1-芝麻脂素(1-sesamin), 其具有镇痛活性、抗病毒、抗气管炎等作用^[21]。40 号峰为柳杉醇(Cryptomeridiol), 是一种桉烷型倍半萜, 有研究表明桉烷型倍半萜具有良好的生理活性, 如有抗炎活性、抗肿瘤活性, 显示弱的抗菌活性和对咸水虾幼虫的抑制活性等^[22]。

3 讨论

3.1 不同富营养化程度对纸莎草生长的影响

作为人工湿地的功能植物, 生物量越大, 其处理效果越好。而植物地下部生长好坏直接影响到地上部的生物量。在自然湿地、沼泽、泛滥平原上, 挺水植物由于其对污水的高耐受能力而对保护水质、吸收水体和沉积物中的有机物及养分起着重要作用^[4]。纸莎草是最大的草本植物之一, 能长到高出地面 5 m, 其地下部年生物量可达 $2.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[3-4]。据估计, 纸莎草的自然分布仅限于非洲腹地从 17°N 到 29°S 之间的带状区域的潮湿地带。本文中的纸莎草地下部生物量为 $17.43 \sim 31.80 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 以每平方米生长 100 株计^[4], 则本文纸莎草地下部的生物量约为 $1.74 \sim 3.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 与原产地相当甚至略高。鉴于本文采样地气候条件不如纸莎草原产地, 因此本文所得如此高的纸莎草地下部生物量应该与其所处的水体富营养化及土壤肥力条件有关。

3 个采样点相距不远, 其原始土壤条件可以认为是一致的。采样时土壤肥力有显著差异, 如上、中、下游土壤全氮之比为 2.20:1.67:1, 全磷之比为 2.14:1.17:1, 有机质之比为 2.12:1.08:1。这种差异应该是近期生物参与成土过程的结果。源头的生活污水流经上游纸莎草时, 其中的养分被迅速吸收, 到中、下游时水中养分大幅度减少, 如上、中、下游水中全氮之比为 4.49:1.95:1, 全磷之比为 35.9:20.0:1, DOC 之比为 4.68:2.32:1。不同营养条件下纸莎草地下部的营养状况和生物量随之变化, 如上、中、下游纸莎草地下部全氮之比为 1.62:0.91:1, 全磷之比为 1.38:1.16:1, 地下部生物量之

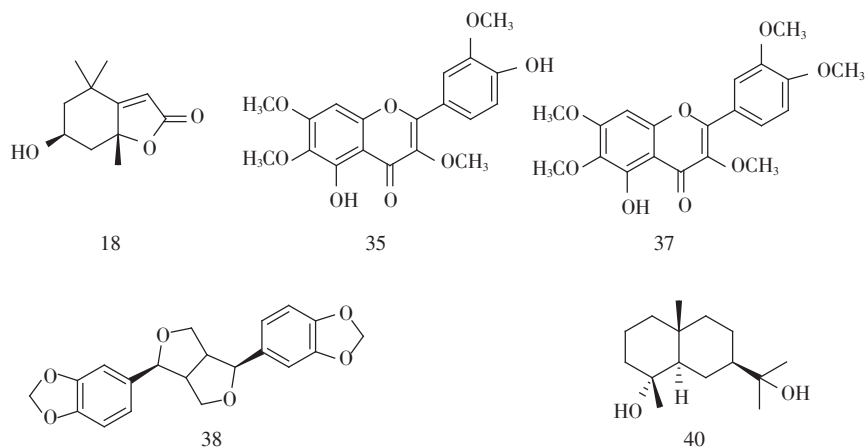


图 6 单体化合物的结构式

Figure 6 Structure of compounds from *C. papyrus*

比为 1.82:1.61:1。不同的生物量导致每年归还到土壤中的有机物的量也有显著差异。Mnaya 等研究表明,纸莎草凋落物生物量约占地上部生物量的 14%^[4]。长此以往的结果就是土壤肥力的差异。土壤肥力的差异又继续影响植物的生长。

3.2 不同富营养化程度对纸莎草化学成分的影响

植物地下部是植物重要的营养吸收器官,直接影响到植物的生长发育。其化学成分十分丰富,虽然本试验纸莎草地下部的 HPLC 图谱中标识出了 50 种可能存在的化合物,但它们并不能代表纸莎草地下部的全部化合物种类。对植物来说,不同的营养条件必然导致其吸收的养分数量发生变化,进而影响其体内的代谢强度,甚至改变代谢途径,从而导致其体内化学成分的变化。在植物营养学上往往关注营养条件与收获物关键成分之间的关系,如油料作物的脂肪含量、饲料作物的蛋白质含量等。这些研究中关注的化学成分都是具有相同属性的某一大类物质的总和。而对于新药开发领域,则必须具体到分子水平。本文结果表明,不同富营养化程度下纸莎草地下部化学成分变化显著。如从上游到下游随水体富营养化程度的降低 1-芝麻脂素(38)的含量显著增加,柳杉醇(40)的含量有增加的趋势,但只有上游、中游较下游间达到了显著性差异;黑麦草内酯(18)含量显著减小;猫眼草黄素(35)和青蒿亭(37)的含量受水质影响不大;另外,还有 10 种未分离鉴定的化合物(4、5、6、7、10、12、14、22、27、30 号峰)的含量随着水体富营养化程度的降低而显著增加,有 2 种(42、45 号化合物)显著减少,其他化合物受水质影响变化不规律。显然,要使本文结果应用于生产,还必须借助于 NMR、MS、UV(紫外

光谱)、IR(红外光谱)等技术来确定这些未知成分的分子结构,并进行一系列细胞学毒理实验,明确其药用价值。在有药用价值的基础上,再来研究富营养化水平或营养条件对某种或某些关键药用成分含量及纸莎草生物量的影响,进而达到通过调控营养条件实现纸莎草最大药用价值的目的。

4 结论

(1)水体富营养化水平显著影响纸莎草地下部的生物量,随着水体富营养化程度的降低,其生物量呈下降的趋势,其中下游较上、中游都显著下降,分别下降了 45.2% 和 37.9%。纸莎草地下部生物量达到 1.74~3.18 kg·m⁻²,与原产地相当甚至略高。

(2)不同富营养化程度显著影响纸莎草地下部氮、磷的含量,其中中游和下游氮的含量较上游都显著下降,分别下降了 43.5% 和 38.2%,磷的含量分别下降了 16.2% 和 27.7%;而对钾含量的影响不显著。

(3)纸莎草化学成分受水体富营养化程度的影响很大,从上游到下游 1-芝麻脂素(38)的含量显著增加,柳杉醇(40)的含量有增加的趋势;黑麦草内酯(18)含量显著减小;猫眼草黄素(35)和青蒿亭(37)的含量受水质影响不大;在未分离鉴定的化合物中,还有 10 种化合物的含量随着水体富营养化程度的降低而显著增加,有 2 种显著减少,其他化合物受水质影响变化不规律;未分离鉴定的化合物的具体分子结构需进一步研究。

参考文献:

[1] 王红强,朱慧杰,张丽萍,等.伊乐藻中有机酸的 GC-MS 分析及其

- 抑藻作用研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7):23-26.
- WANG Hong-qiang, ZHU Hui-jie, ZHANG Li-ping, et al. Organic acid from *Elodea nuttallii* by GC-MS and its inhibitory effects on algae growth[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(7):23-26.
- [2] 李冬林, 王磊, 丁晶晶, 等. 水生植物的生态功能和资源应用[J]. 湿地科学, 2011, 9(3):290-296.
- LI Dong-lin, WANG Lei, DING Jing-jing, et al. Ecological functions and resource utilization of aquatic plants[J]. *Wetland Science*, 2011, 9(3):290-296.
- [3] Perbangkhem T, Polprasert C. Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(2):833-835.
- [4] Mnaya B, Asaeda T, Kiwango Y, et al. Primary production in papyrus (*Cyperus papyrus* L.) of Rubondo Island, Lake Victoria, Tanzania[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2007, 15(4):269-275.
- [5] Fonkou T I, Balock S, Lekeufack M, et al. Potential of *Cyperus papyrus* in yard-scale horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment in Cameroon[J]. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 2011, 1(2):160-168.
- [6] SHI Lei, WANG Bao-zhen, CAO Xiang-dong, et al. Performance of a subsurface-flow constructed wetland in Southern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(3):476-481.
- [7] 石雷, 王宝贞, 曹向东, 等. 沙田人工湿地植物生长特性及除污能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):98-103.
- SHI Lei, WANG Bao-zhen, CAO Xiang-dong, et al. Growing characteristics of several plants and their removal ability on pollutants in Shatian constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(1):98-103.
- [8] 徐燕, 李大淩, 凌铁军, 等. 香附化学成分研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2010(11):214-218.
- XU Yan, LI Da-xiang, LING Tie-jun, et al. Advances in studies on chemical constituents of rhizomes of *Cyperus rotundus* [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2010(11):214-218.
- [9] Khamsan S, Liawruangrath B, Liawruangrath S, et al. Antimalarial, anticancer, antimicrobial activities and chemical constituents of essential oil from the aerial parts of *Cyperus kyllingia* Endl[J]. *Records of Natural Products*, 2011, 5(4):324-327.
- [10] 刘国卿, 王秋娟, 谢卓丘. 香附挥发油药理研究[J]. 中国药科大学学报, 1989, 20(1):48-50.
- LIU Guo-qing, WANG Qiu-juan, XIE Zhuo-qiu. Pharmacological effects of volatile oil of *Cyperus rounds* [J]. *Journal of China Pharmaceutical University*, 1989, 20(1):48-50.
- [11] Buchala A J, Meier H. Hemicelluloses from the stalk of *Cyperus papyrus* [J]. *Phytochemistry*, 1972, 11(11):3275-3278.
- [12] Hassanein H M, Nazif N M, Ehsan N A, et al. Lipid composition and evaluation of hepatoprotective activity of *Cyperus esculentus* L. and *Cyperus papyrus* tubers grown in Egypt[J]. *Advances in Food Sciences*, 2011, 33(2):65-72.
- [13] 赵琴, 梁锐君, 张玉洁, 等. 余甘子根的化学成分研究[J]. 中草药, 2013, 44(2):133-136.
- ZHAO Qin, LIANG Rui-jun, ZHANG Yu-jie, et al. Chemical constituents in roots of *Phyllanthus emblica* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2013, 44(2):133-136.
- [14] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:300.
- JIN Xiang-can, TU Qing-ying. Investigation handbook of lake eutrophication[M]. 2nd Ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990:300.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Analysis of agricultural chemistry in soil[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 占新华, 周立祥. 土壤溶液和水体中水溶性有机碳的比色测定[J]. 中国环境科学, 2002, 22(5):433-437.
- ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang. Colorimetric determination of dissolved organic carbon in soil solution and water environment[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(5):433-437.
- [17] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- State Environmental Protection Administration, Water and Waste Water Monitoring and Analysis Methods of the Editorial Board. Water and waste water monitoring and analysis methods[M]. 4th Ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.
- [18] 高景莘, 夏厚林, 吴远波. 香附药材 HPLC 指纹图谱研究及相似度评价[J]. 中国中医药咨讯, 2010(14):240-241.
- GAO Jing-xin, XIA Hou-lin, WU Yuan-bo. Study on fingerprint of *Cyperus rotundus* by HPLC and similarity evaluation[J]. *Journal of China Traditional Chinese Medicine Information*, 2010(14):240-241.
- [19] 林晨. 倍半萜内酯类化合物的作用机制及其细胞抑制作用的细胞学和分子学基础的研究[J]. 国外医学. 药学分册, 1981, 2:119-120.
- LIN Chen. The cytological and molecular basis and mechanism of sesquiterpene lactones as a cyto-inhibitor[J]. *Foreign Medical Sciences Section On Pharmacy*, 1981, 2:119-120.
- [20] 黄明发, 苏学素, 焦必宁, 等. 柑橘多甲氧基黄酮的检测及分离纯化技术研究进展[J]. 食品科学, 2009, 30(1):275-281.
- HUANG Ming-fa, SU Xue-su, JIAO Bi-ning, et al. Research progress of determination, separation and purification technologies for Citrus polymethoxylated flavones[J]. *Food Science*, 2009, 30(1):275-281.
- [21] 蔡少青, 王禾, 陈世忠. 北细辛非挥发性化学成分的研究[J]. 北京医科大学学报, 1996, 28(3):228-230.
- CAI Shao-qing, WANG He, CHEN Shi-zhong. Studies on the non-volatile chemical constituents of *Asarum heterotropoides* var. *mandshuricum* [J]. *Journal of Beijing Medical University*, 1996, 28(3):228-230.
- [22] 邱蕴绮, 漆淑华, 张 偲. 阔苞菊属植物化学成分与药理活性研究进展[J]. 中草药, 2008, 39(7):1101-1105.
- QIU Yun-qi, QI Shu-hua, ZHANG Si. Advances in studies on chemical constituents in plants of *Pluchea* Cass. and their pharmacological activities[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2008, 39(7):1101-1105.