

典型挺水植物应用于湿地生态修复工程 污染净化效应差异性研究^{*}

卢秀秀^{1,2} 刘云根^{1,2#} 王妍¹ 张超¹ 李成荣¹ 伏川东¹

(1.西南林业大学生态与环境学院,云南 昆明 650224;

2.云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室,云南 昆明 650224)

摘要 以洱海流域北部上游东湖片区库塘湿地中水生植物为研究对象,选取5种主要水生植物,寻求净化湿地水质的最佳植物组合。结果表明:东湖片区库塘湿地水体总磷、总氮、氨氮、化学需氧量分别为0.09~0.23、0.80~3.28、0.18~0.89、12.00~37.00 mg/L,总体符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类要求;综合比较发现,植物组合群落生物量和碳氮磷累积效应优于单一植物;植物组合对水体碳氮磷具有一定的吸收净化作用。

关键词 洱海流域 东湖片区库塘湿地 生态修复 碳 氮 磷 植物

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.01.015

Study on the difference of pollution purification effect of typical water-holding plants applied to wetland ecological restoration projects LU Xiuxiu^{1,2}, LIU Yungen^{1,2}, WANG Yan¹, ZHANG Chao¹, LI Chengrong¹, FU Chuandong¹. (1.College of Ecology & Environment, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224; 2.Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous & Rural Areas of Yunnan Province, Kunming Yunnan 650224)

Abstract: Taking the aquatic plants in the East Lake Area reservoir wetlands of the northern upper reaches of the Erhai River Basin as the research object, five main aquatic plants were selected to seek the best plant combination for purifying wetland water quality. The results showed that the total phosphorus, total nitrogen, ammonia nitrogen and chemical oxygen demand of the reservoir water in the East Lake Area reservoir wetlands were 0.09-0.23, 0.80-3.28, 0.18-0.89, and 12.00-37.00 mg/L, respectively, which overall met the Class IV requirements of "Environmental quality standards for surface water" (GB 3838-2002). Through comprehensive comparison, it was found that the biomass and carbon, nitrogen, and phosphorus accumulation effects of plant combination communities were superior to those of single plants. Plant combinations had a certain absorption and purification effect on carbon, nitrogen, and phosphorus in water.

Keywords: Erhai River Basin; the East Lake Area reservoir wetlands; ecological restoration; carbon; nitrogen; phosphorus; plant

农村农业面源污染一直是制约以洱海为代表的高原湖泊水环境治理成效的突出短板^[1]。湿地作为“地球之肾”,对拦截湖泊外源污染和净化农村农业面源污染发挥着重要作用^[2]。近年来,国内外有关湿地净化和治理高原湖泊水体的相关问题,已获较系统的研究结果^[3]。万金保等^[4]通过湿地系统实验研究得出,人工湿地对总磷(TP)、化学需氧量(COD)、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮的去除率分别为73.5%、48.79%、78.5%、54.70%。詹乃才等^[5]以岩溶湖滨湿地为研究对象,对岩溶湖滨湿地水体-沉积物-挺水植物进行研究,结果表明,岩溶湖滨湿地对

外源磷的拦截作用明显。

湿地植物是湿地生态修复工程中不可缺少的一部分,具有吸收、拦截、过滤污染物等作用^[6]。湿地植物、微生物和基质的选择和构建,是湿地生态系统稳定运作的关键。目前,大量研究都以室内模拟实验为基础,选择单一的水生植物适应不同的水质污染程度,得出单一水生植物具有抗逆性较差、净化能力有限等问题^[7]。而不同湿地植物组合净化污水效果较单一植物更明显,尤其是挺水植物对氮、磷和有机质等富营养物质具有良好的吸收和富集累积效应^[8]。岳海涛等^[9]对湿地水生植物进行了深入研

第一作者:卢秀秀,女,1997年生,硕士研究生,主要从事污染水体修复及控制研究。[#]通讯作者。

^{*}国家自然科学基金资助项目(No.32160405);云南省科技厅科技计划项目(No.2019FB070、No.202001AT070117)。

究,认为挺水植物较浮水植物更具优势。湿地植物在污染物吸收与累积方面的效果得到广泛的认可,但在野外进行大型湿地生态修复的过程中,植物选择与配置对污染净化效果影响的相关研究较少。因此,本研究以洱海流域北部上游东湖片区库塘湿地中水生植物为研究对象,采用实地调查、取样、室内分析等方法,对比挺水和浮水植物组合,分析植物对水体污染物的吸收累积特性,并寻求净化湿地水质的最佳植物组合,以期为大规模库塘湿地水质恢复和湿地退化恢复提供理论基础和科学依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

洱海作为九大高原湖泊,为控制农村农业面源污染,构建了 2 000 hm²生态净化湿地,对相关污染防治发挥了重要作用,其中库塘湿地占地总面积 31.3 km²。本研究选取洱海流域北部上游东湖片区库塘湿地作为研究区域,面积约 4.87 km²,为北亚热带高原季风气候,年均气温 13.6 ℃,年均降雨量约 760 mm,是洱海支流永安江流经之地。

东湖片区库塘湿地是削减洱海源头携带的农业面源污染物、提升入洱海水质的第一道屏障。湿地

东北和西北部分别有永安江、茈碧湖携带的大量泥沙、磷污染物注入。湿地内多为人工栽植的水生植物,其中挺水植物为芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)、茭草(*Zizania latifolia*);浮水植物为睡莲(*Nymphaea tetragona*)和荷花(*Nillumbik nucifera*)。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点布设和样品采集

选取具有代表性的东湖片区库塘湿地,结合水域面积、水流方向及植物分布情况,设置 4 个采样区域(见图 1)。对各区域进行单点采样,每个采样点均采用全球定位系统(GPS)定位,样品采集时间为 2020 年 8 月,每个采样点采集 3 个水样和 3 个植物样,采集情况见表 1。在水面以下 0.5 m 处采集 550 mL 水样,置于冷藏箱中保存运输,带回实验室 48 h 内进行分析测定;植物样在 0.5 m×0.5 m 的样方内采集,每个植物样选取 5~10 株典型植物代表,取其茎、叶,分装进贴有标签的自封袋并带回实验室检测。

1.2.2 样品分析和测定方法

水样中,根据文献[10]中相关标准方法测定 TP、磷酸盐、总氮(TN)、氨氮、COD;采用 HQ40D 便携式水质监测仪测定 pH 和溶解氧(DO)。

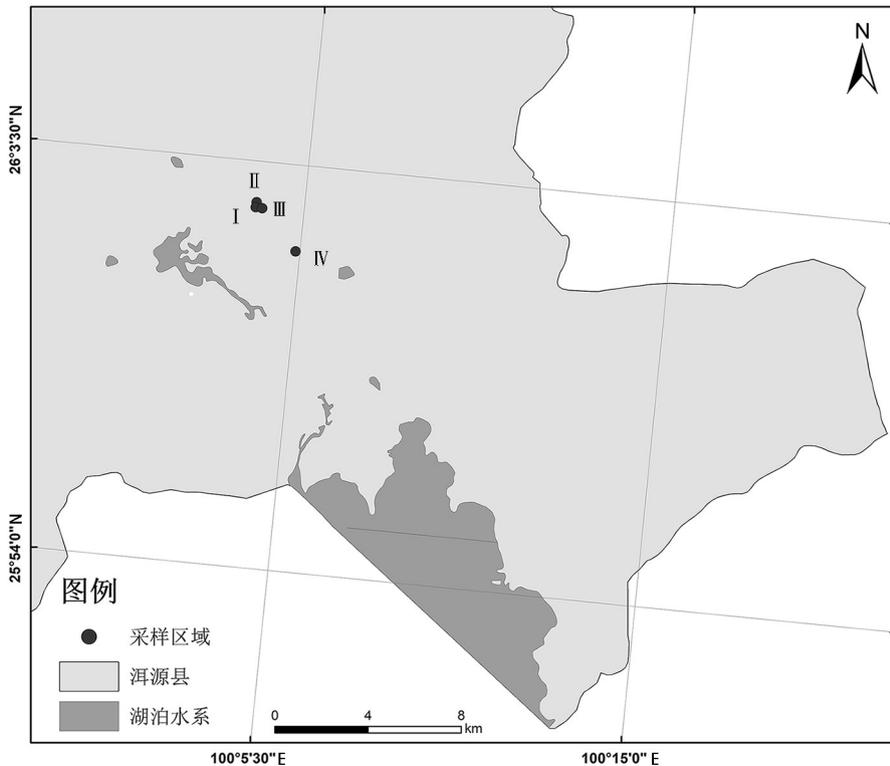


图 1 研究区域及采样区域
Fig.1 Research area and sampling area

表 1 样品采集情况
Table 1 Sample collection status

采样区域	采样点数	植物种类
大树营 I 号区	6	茭草、香蒲、芦苇、荷花
大树营 II 号区	8	茭草、芦苇、香蒲、荷花
大树营 III 号区	7	茭草、香蒲、芦苇、荷花
大树营 IV 号区	10	茭草、香蒲、芦苇、荷花、睡莲

表 2 东湖片区库塘湿地水质状况
Table 2 Water quality conditions in the East Lake Area reservoir wetlands mg/L

采样区域	TP	磷酸盐	TN	氨氮	COD
大树营 I 号区	0.20~0.23	0.02~0.04	1.84~3.28	0.36~0.89	12.00~21.00
大树营 II 号区	0.11~0.19	0.02~0.44	1.01~2.21	0.21~0.52	15.00~37.00
大树营 III 号区	0.09~0.19	0.02~0.03	1.24~1.39	0.18~0.75	13.00~27.00
大树营 IV 号区	0.17~0.22	0~0.04	0.80~2.82	0.33~0.84	12.00~31.67

表 3 单种水生植物的生物量及碳氮磷累积量¹⁾
Table 3 Biomass and carbon, nitrogen and phosphorus accumulation of single aquatic plant

植物	生物量/(kg/m ²)	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	TOC/(g/kg)
芦苇	3.74±0.92d	13.90±0.29d	1.66±0.08c	725.31±11.14b
睡莲	6.32±1.45b	21.69±0.19b	6.74±0.31a	700.60±6.59b
茭草	10.13±0.26a	19.95±0.32c	6.32±0.52b	740.93±2.46ab
荷花	5.99±1.55bc	26.21±0.17a	2.14±0.11c	814.38±17.00a
香蒲	10.11±1.87a	13.86±0.40d	0.66±0.12c	789.54±1.27a

注: ¹⁾ 同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著, 表 4 至表 5 同。

植物样于 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 下烘至恒重, 磨碎过 65 目筛后, 根据文献[11]中凯氏定氮法测定全氮, 过硫酸钾消解/钼酸铵分光光度法测定全磷, 重铬酸钾氧化-外加热法测定总有机碳(TOC)。

1.2.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 进行数据处理和统计分析, 采用单因素方差分析(ANOVA)检验植物及植物配置之间生物量和碳氮磷累积特征差异, 利用 Pearson 相关分析方法分析植物和水质的相关性, 图表采用 ArcGIS 10.0 和 Origin 2021 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 湿地水环境质量评价

东湖片区库塘湿地水体 TP 为 0.09~0.23 mg/L(见表 2), 符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 IV 类要求, 局部样点水质可满足 II 类要求, 有效印证了东湖片区库塘湿地 TP 趋于同等污染状态。TN 和氨氮分别为 0.80~3.28、0.18~0.89 mg/L, 所有采样点中 TN 普遍较高, 超过 V 类要求, 而氨氮符合 III 类要求。COD 为 12.00~37.00 mg/L, 大树营 II 号区湿地 COD 最高, 超过 III 类要求。综上可知, 研究区各采样点水质状况总体符合 IV 类要求。

2.2 湿地水生植物组合碳氮磷的累积特征

2.2.1 单种水生植物

单种水生植物生物量为 3.74~10.13 kg/m²(见表 3), 表现为茭草>香蒲>睡莲>荷花>芦苇, 其中茭草与荷花、睡莲、芦苇差异显著, 与香蒲差异不显著。全氮最高为荷花(26.21 g/kg), 最低为香蒲(13.86 g/kg), 表现为荷花>睡莲>茭草>芦苇>香蒲。睡莲和茭草呈现更好的磷吸收累积特性, 睡莲全磷最高(6.74 g/kg), 香蒲最低(0.66 g/kg), 其他植物磷累积仅为睡莲和茭草的 1/5~1/3 的吸收效应, 全磷依次为睡莲>茭草>荷花>芦苇>香蒲。荷花的 TOC 最高(814.38 g/kg), 表明荷花在吸收 TOC 方面具有优势。

2.2.2 两种水生植物组合

两种水生植物组合模式下生物量为 9.06~15.50 kg/m²(见表 4), 其中茭草+睡莲群落生物量最大、芦苇+荷花群落则最小。茭草+睡莲群落全磷最大(14.87 g/kg), 芦苇+荷花群落全磷最小(1.22 g/kg), 茭草与其他植物组合的群落全磷普遍偏高, 说明这几类植物可能对磷具有富集效应。香蒲+荷花群落全氮最高(84.45 g/kg), 香蒲+芦苇群落全氮最低(12.36 g/kg), 香蒲与荷花、茭草组合时全氮累积具有优势, 表明植物需氮量较大。香

表 4 两种水生植物组合的生物量及碳氮磷累积量

Table 4 Biomass and carbon, nitrogen and phosphorus accumulation of two aquatic plant assemblages

植物	生物量/(kg/m ²)	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	TOC/(g/kg)
香蒲+荷花	15.45±0.53a	84.45±4.95a	6.27±0.68bc	2 512.00±9.46a
香蒲+芦苇	13.00±1.23ab	12.36±0.18d	1.39±0.36c	823.07±1.17b
香蒲+茭草	15.48±0.63a	31.07±0.33c	10.79±0.15ab	1 578.65±8.18ab
茭草+芦苇	9.58±0.39cd	36.26±3.96c	6.75±0.12bc	1 568.17±4.58ab
茭草+荷花	10.69±0.88cd	59.01±3.98b	6.20±0.05bc	2 254.98±14.36a
茭草+睡莲	15.50±0.53a	35.45±2.23c	14.87±0.04a	768.54±6.60c
芦苇+荷花	9.06±0.62d	17.63±0.22d	1.22±0.06c	1 382.17±5.79ab
睡莲+荷花	12.31±0.67bc	19.95±0.27d	2.63±0.21c	640.20±5.20cd

表 5 3 种水生植物组合的生物量及碳氮磷累积量

Table 5 Biomass and carbon, nitrogen and phosphorus accumulation of three aquatic plant assemblages

植物	生物量/(kg/m ²)	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	TOC/(g/kg)
芦苇+香蒲+荷花	19.03±0.65b	13.11±0.85a	1.52±0.10b	779.14 ±34.23a
芦苇+睡莲+茭草	17.95±0.29b	13.48±0.69a	6.29±0.30a	810.32 ±26.10a
睡莲+香蒲+茭草	26.55±0.93a	13.94±0.14a	6.90±1.40a	678.03±16.62b

表 6 湿地中水生植物碳氮磷与水体理化性质的相关性¹⁾

Table 6 Correlation between carbon, nitrogen and phosphorus of aquatic plants and physicochemical properties of water in wetland

植物	指标	TOC	全氮	全磷	pH	DO	COD	TP	磷酸盐	TN	氨氮
香蒲	TOC	1.00	-0.10	-0.01	-0.07	-0.29	0.19	-0.13	-0.34	-0.34	0.08
	全氮		1.00	0.42 *	-0.83 * *	0.40 *	-0.28	0.07	-0.53 * *	0.02	-0.16
	全磷			1.00	-0.62 * *	-0.32	-0.15	0.22	-0.64 * *	-0.01	0.53 * *
芦苇	TOC	1.00	-0.04	0.50 *	-0.46 *	-0.38	-0.42	0.10	-0.22	-0.28	-0.30
	全氮		1.00	-0.44 *	0.27	0.39	0.11	-0.25	0.31	-0.07	-0.34
	全磷			1.00	-0.90 * *	-0.88 * *	-0.30	0.30	-0.52 *	-0.26	-0.05
茭草	TOC	1.00	0.31	0.12	-0.12	-0.07	-0.16	0.32	-0.15	0.31	0.24
	全氮		1.00	0.21	-0.41	-0.55 *	-0.26	0.79 * *	-0.02	0.76 * *	0.73 * *
	全磷			1.00	-0.87 * *	-0.83 * *	-0.48 *	0.26	0.05	-0.06	0.05
荷花	TOC	1.00	0.05	0.14	0.09	0.03	-0.07	0.25	-0.38	0.10	-0.04
	全氮		1.00	-0.42	0.67 * *	0.70 * *	0.04	-0.54 *	0.20	0.22	-0.22
	全磷			1.00	-0.19	-0.29	-0.24	0.47 *	-0.49 *	-0.20	0.03
睡莲	TOC	1.00	-0.11	0.37	-0.28	0.28	0.82 * *	0.05	0.03	-0.36	0.31
	全氮		1.00	0.14	0.78 *	-0.14	-0.26	0.33	-0.28	0.78 *	-0.12
	全磷			1.00	0.23	0.35	0.31	-0.27	-0.40	-0.11	-0.06

注: ¹⁾ * * 为在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 为在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

蒲+荷花群落 TOC 最大(2 512.00 g/kg),睡莲+荷花群落 TOC 最小(640.20 g/kg),香蒲+荷花、茭草+荷花组合的群落 TOC 累积明显优于其他水生植物群落,表明各植物根系泌氧能力差别较大。综上可知,植物组合群落在很大程度上对水体污染物有较明显的吸收效果。

2.2.3 3 种水生植物组合

3 种水生植物组合的生物量为 17.95~26.55 kg/m²(见表 5),其中睡莲+香蒲+茭草与其他植物群落生物量差异显著。3 个植物群落 TOC、全氮和全磷也不同,其中全磷和 TOC 存在显著差异,全

氮差异均不显著。

2.3 单种水生植物碳氮磷与水体理化性质的相关性分析

表 6 证实了水质条件的差异与水生植物营养含量的累积有关。部分采样点水生植物营养含量与水体 pH、DO 和磷酸盐等水质参数间存在显著关系,表明植物所吸收的营养元素与所在水域环境的差异密切相关。其中,挺水植物氮磷元素与大部分水体氮磷指标存在显著相关性;浮水植物中,荷花全磷与水体磷酸盐呈现出显著相关性,而睡莲 TOC 与水体 COD 存在显著正相关。总体结果表明,水生植

物不仅有效吸收水体中的氮磷等元素,还能实现水体营养平衡,改善水体自净能力。

3 讨论

(1) 研究区水质指标含量总体偏高,可能是区域面积狭小、湿地植物类型或植物配置组合较复杂、生活污水及农田农药化肥的排放等造成^[12]。而湿地水体氮磷营养盐来源是沉积物释放养分、植物残体降解等^[13]。结合表 2 可知,研究区水体存在较高富营养化风险,这与部分学者研究类似,认为是来自陆源污染^[14]。同时,研究区存在局部区域氮磷差异较大、空间分布不均匀的现象,这与土地利用景观分区、人类活动、植物组合及水流流向等因素有关^[15]。

(2) 水生植物对湿地碳氮磷具有较好吸收和净化效果,最直观表现为直接吸收和利用湿地过量的氮磷,为植物提供足够的营养。此外,植物自身特性与氮磷积累有关^[16]。植物生长周期对其吸收和利用氮磷的能力有很大影响,在生长期,植物必须通过吸收外界的养分来维持其正常生长^[17]。同时,研究区水生植物 TOC 远高于黄玉洁等^[18]所做的研究,说明该地区生态条件为植物提供了充足的碳含量,有利于其生长;全磷也高于鲁静等^[19]在洱海流域湿地植物磷含量测定值,原因是植物可吸收的磷含量受沉积物影响。唐玥等^[20]研究表明,植物氮累积量远大于磷累积量,氮磷是植物生长发育和吸收养分的限制因子。挺水植物具有净化水体污染、改善土壤环境、抑制水体中的藻类等作用,这与张敏等^[21]研究结果相似。

(3) 本研究发现,挺水植物茭草、香蒲和芦苇固碳能力较强,因其含有更多富含碳结构性的物质支撑其生长需要,这与夏成星^[22]研究结果类似。有研究表明,挺水植物碳氮磷累积量优于浮水植物,原因是其对水体氮磷的吸收是主动的,消耗能量较多;其次挺水植物生长空间较大,使生物量增多^[23]。同时,湿地植物单一性对湿地水质净化有一定的限制作用。如元文革等^[24]选择 4 种挺水植物进行水培试验,发现植物组合对污染物的净化效果优于单一栽培。彭婉婷等^[25]通过室内静水实验发现,不同水生植物组合后对水中氮磷具有较好净化效果。本研究中,综合比较发现,植物组合群落碳氮磷累积效应优于单一植物,水生植物配置不仅能丰富微生物的多样性,而且能加强其对湿地中污染物的吸收和降解^[26];多种植物组合群落生物量的明显增加,表明构建合理的湿地植物群落对湿地净化具有持续性,

也从另一个方面说明植物生物量及其碳氮磷累积量反映着对污染物的去除能力。

(4) 部分采样点水生植物营养含量与水体 pH、DO 和磷酸盐等水质参数间存在显著关系,植物组合对水体碳氮磷具有一定的吸收净化作用。在适宜条件下,植物通过营养繁殖迅速积累生物量,氮磷是植物所必需的养分^[27]。而氮磷等污染物的增加,有利于植物的生长与繁殖^[28]。因此,在湿地恢复利用植物的过程中,应注重构建合理的植物群落,才能有效控制污染负荷^[29]。

4 结论与建议

(1) 东湖片区库塘湿地水体 TP、TN、氨氮、COD 分别为 0.09~0.23、0.80~3.28、0.18~0.89、12.00~37.00 mg/L,总体符合 IV 类要求。

(2) 综合比较发现,植物组合群落生物量和碳氮磷累积效应优于单一植物。

(3) 部分采样点水生植物营养含量与水体 pH、DO 和磷酸盐等水质参数间存在显著关系,植物组合对水体碳氮磷具有一定的吸收净化作用。建议当地加强对库塘湿地水质监管力度,并根据水质特征选择最优植物配置进行治理。

参考文献:

- [1] 王圣瑞,何宗健,赵海超,等.洱海表层沉积物中总氮含量及氮的释放特征[J].环境科学研究,2013,26(3):256-261.
- [2] FAN X, CUI B, ZHANG Z, et al. Research for wetland network used to improve river water quality[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 2353-2361.
- [3] BEUTEL M W, NEWTON C D, BROUILLARD E S, et al. Nitrate removal in surface-flow constructed wetlands treating dilute agricultural runoff in the lower Yakima Basin, Washington [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(10): 1538-1546.
- [4] 王金保,兰新怡,汤爱萍.多级表面流人工湿地在鄱阳湖区农村面源污染控制中的应用[J].水土保持通报,2010,30(5):118-121,146.
- [5] 詹乃才,王妍,刘云根,等.滇东南典型岩溶湖滨湿地水体-沉积物-植物总磷分布特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(3):50-60.
- [6] CUI L, OUYANG Y, GU W, et al. Evaluation of nutrient removal efficiency and microbial enzyme activity in a baffled sub-surface-flow constructed wetland system[J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 656-662.
- [7] 刘建伟,周晓,吕臣,等.三种挺水植物对富营养化景观水体的净化效果[J].湿地科学,2015,13(1):7-12.
- [8] 李峰平,魏魏,魏魏,马喆,等.人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展[J].湿地科学,2017,15(6):849-854.

(下转第 98 页)