

狗牙根与多花黑麦草轮作对富营养水体的净化能力研究

徐 芳^{1,2}, 宗俊勤¹, 牛佳伟^{1,2}, 陈静波¹, 李丹丹¹, 李兰兰¹, 刘建秀^{1*}

(1.江苏省中国科学院植物研究所 南京中山植物园, 南京 210014; 2.南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

摘 要:在自然光温条件的温室内,以暖季型牧草——Tifton 85 狗牙根(*Cynodon dactylon* Tifton 85)和三种冷季型牧草——特高、麦克斯、剑宝多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)为试验材料,以不种植植物的重度富营养水体为对照,通过比较不同季节的供试植物与相应对照间总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)的去除率差异,结合植株生物量变化及氮磷积累量的分析,研究不同季节适生植物对重度富营养的生活污水的净化效果,以优选出终年净化污染水体的植物组合。结果表明:不同季节试验结束后各供试牧草水上部分干重增加量均占总增加量的 71.0%以上,植株氮磷积累量对系统去除总量的贡献率分别达 76.0%和 84.0%以上,供试植物的净化效果显著优于对照;温暖季节的 Tifton 85 处理重度富营养水体 16 d 后,TN、TP、COD 的去除率分别为 98.2%、98.3%、70.7%,TN、TP 均降至非富营养浓度,COD 降至中度富营养浓度;寒冷季节盖播的 3 个多花黑麦草对 TN 和 TP 的去除率存在显著差异,特高表现最好,分别为 96.8%和 92.1%,TN、TP 均降至非富营养浓度,品种间 COD 去除率虽无显著差异,但已降至中度富营养浓度。综合以上结果,暖季型的 Tifton 85 净化效果优异,冷季型的特高净化效果最好,Tifton 85 和特高可作为长三角地区周年水体净化的优异牧草组合进行推广。

关键词:富营养水体;水体净化;狗牙根;多花黑麦草

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)07-1341-08 doi:10.11654/jaes.2015.07.016

Purification of Eutrophic Water by Bermudagrass and Ryegrass Rotation

XU Fang^{1,2}, ZONG Jun-qin¹, NIU Jia-wei^{1,2}, CHEN Jing-bo¹, LI Dan-dan¹, LI Lan-lan¹, LIU Jian-xiu^{1*}

(1.Institute of Botany Province & Chinese Academy of Science, Nanjing 210014, China; 2.College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Purification of eutrophic water by biological methods has aroused increasing interests. Here a warm-season forage — *Cynodon dactylon* Tifton 85 and three cool-season forages — *Lolium multiflorum* (Tetragold, Jumbo and Maximus) were grown in rotation to examine their purifying abilities for eutrophic water in order to screen out a proper forage combination that can be used year-roundly. The removals of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chemical oxygen demand (COD) in the eutrophic water and the nitrogen (N) and phosphorus (P) accumulation in the plants were employed as the indexes for evaluating performance of those plants. The dry biomass of the above-water parts of those plants accounted for more than 71.0% of total dry biomass, and the N and P uptake by above-water parts amounted to more than 76.0% and 84.0% of the total removal by the system, respectively. Purifying abilities of those different plants were significantly higher than that of the control. After 16 days of Tifton 85 treatment, the removal efficiencies of TN, TP and COD were 98.2%, 98.3% and 70.7%, respectively, and the TN and TP reduced to non-eutrophic levels while COD dropped to moderate eutrophic level. After 25 days of growth, Tetragold showed the best performance among three ryegrass cultivars, its TN and TP removal efficiencies were 96.8% and 92.1%, respectively, and the COD dropped to moderate eutrophication. All the results indicate that Tifton 85 and Tetragold could be used as an excellent forage combination for purifying eutrophic water over the whole year in the delta region south of Yangtze River.

Keywords: eutrophic water; water purification; bermudagrass; ryegrass

收稿日期:2015-02-27

基金项目:国家重大科技专项课题研究专题(2012ZX07101-005);江苏省水利厅项目(2014001)

作者简介:徐 芳(1990—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事景观生态及水体修复方面的研究。E-mail:xf1064013100@163.com

* 通信作者:刘建秀 E-mail:turfunit@aliyun.com

人类生活产生的各类污水越来越多,其中包含的大量有机物、无机盐、病原菌等使得水体富营养化日益严重,急需开展生活污水的治理以减轻其对整个水资源的污染^[1]。近年来,以高效净化的植物为主体的植物修复因可在原位修复的同时兼具较高的综合效益得到了快速的发展,适生、高效、有价值的植物筛选和应用显得尤为重要^[2-3]。草本植物是所有绿色植物中种类最多、适应性最强、更新最快的自然资源^[4],其中牧草又是草本植物中具有良好经济价值的一类,所以筛选出净化能力强的优质牧草,是一种可将生态系统由恶性循环转变为良性循环、实现环境效益与经济效益完美统一的有效途径^[5]。

狗牙根(*Cynodon dactylon*)为禾本科狗牙根属多年生草本植物,其根系发达且坚韧,营养体繁殖能力极强,是我国应用较广泛的草种之一^[6-7]。Fonseca等^[8]以污水厂处理的尾水浇灌狗牙根,表明尾水可为狗牙根提供生长所需的氮素及水分,在降低氮素损失的同时节约了灌溉所需的可饮用水。Nogueira等^[9]以尾水作为狗牙根的灌溉用水,发现土壤中氮素含量有所增加,尾水的应用为狗牙根的生长提供了70.0%的铵态氮,同时节省了氮肥的施用,创造了良好的经济价值。相关研究表明,狗牙根在污水浇灌条件下可生长良好,说明狗牙根具有一定的耐污能力,但上述研究均是将污染水体进行资源化利用,未见将狗牙根材料直接应用于水体的原位修复,更未见将Tifton 85狗牙根用于污水修复的报道。

多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)为禾本科黑麦草属的一种优质牧草,在较低温度下可良好生长。周小平等^[10]发现多花黑麦草对污水中总氮(TN)、总磷(TP)的去除率分别为49.2%和67.2%,显著高于另外两种蔬菜及空白对照。徐晓峰等^[11]研究发现磷净化能力强的黑麦草吸收的磷占输入总量的94.3%,适宜在苏南地区冬季污水净化中推广。张志勇等^[12]研究了不同净化系统中多花黑麦草、香根草(*Vetiveria zizanioides*)及水芹(*Oenanthe ascalonicum*)对生活污水的净化能力,发现黑麦草在不同净化系统对氮、磷的累积量均远高于其他植物。相关研究表明多花黑麦草是低温季节净化水体的优良选择^[13],Ding等^[14]研究了不同多花黑麦草对中度富营养水体的净化效果,表明不同品种间存在显著差异。但关于多花黑麦草不同品种对重度富营养水体的修复差异鲜见报道。

草坪的陆地应用中,于温暖季节种植狗牙根、寒冷季节盖播黑麦草已非常普遍,Read等^[15]研究了狗牙

根与多花黑麦草轮作来减轻养殖业对土壤造成的富磷危害,结果表明,采取轮作方式在10月份开始盖播多花黑麦草,收获的干物质及磷积累量显著高于未进行盖播的狗牙根。以这两种植物全年轮作的组合模式来进行水体修复未见报道。本研究以“国家水体污染控制与治理科技重大专项”为依托,通过暖季型牧草——Tifton 85狗牙根和冷季型牧草——3个多花黑麦草品种盖播轮作的方式,研究不同季节植物对水体中营养物质的净化能力,以期优选出适宜终年净化污染水体的植物组合。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试验用水

1.1.1 试验材料

本研究选取牧草型的Tifton 85狗牙根和3个多花黑麦草品种为试验材料,详细信息见表1。Tifton 85狗牙根取自江苏省中国科学院植物研究所草业中心试验地(32°02'N,118°28'E,海拔30 m),2001年从美国引入并在南京地区种植14年,在产量和质量方面均表现优异(未发表资料);3个多花黑麦草品种源自百绿集团,均为在长三角地区良好生长且牧草产量高的优良品种。

表1 试验材料

Table 1 Plants used in this study

材料 Plant	来源 Origin	生长季节 Growing season
Tifton 85 狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> Tifton 85	南京 Nanjing	温暖季节 Warm season
特高多花黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i> Tetragold	百绿集团 Barenbrug	寒冷季节 Cold season
美克斯多花黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i> Maximus	百绿集团 Barenbrug	寒冷季节 Cold season
剑宝多花黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i> Jumbo	百绿集团 Barenbrug	寒冷季节 Cold season

1.1.2 试验水体

研究用水体取自南京市锁金村河道,添加一定的营养盐^[16]后测得温暖和寒冷两个季节试验水体的TN、TP、化学需氧量(COD)浓度分别为25.82、2.53、63.2和27.07、2.81、54.03 mg·L⁻¹。根据水利部发布的《地表水资源质量评价技术规程》中湖库富营养化程度评价标准^[17],判定供试水体均为重度富营养水体。

1.2 试验方法

1.2.1 植物材料预培养

试验在江苏省中国科学院植物研究所草业研究

中心温室内进行,分温暖季节和寒冷季节两个时间段。温暖季节:于2013年4月下旬利用海绵将长势基本一致的当年生带1个腋芽的狗牙根茎段固定于挤塑板载体上,在自来水中预培养两周待狗牙根生根良好后,选择生物量相当的材料进行富营养水体处理。处理前狗牙根的初始鲜重为(54.26±0.96)g。

寒冷季节:于2013年10月下旬对狗牙根进行低修剪后使用多花黑麦草草种(18 kg·hm⁻²的播种量)进行盖播,通过千粒重与播种面积算得每个处理的播种量为22粒,每个处理多播5粒,待多花黑麦草进入分蘖期后将多余的植株拔出,确保各处理的初始苗数相同,并选择生物量相当的材料进行富营养水体处理。处理前3个多花黑麦草的初始鲜重为(12.05±0.04)g。

1.2.2 试验处理

温暖季节试验于2013年5月23日至6月4日进行,试验期间日最大光照强度范围为396.0~883.8 μmol·m⁻²·s⁻¹,日均最高温为39.5℃,最低温为18.5℃。寒冷季节试验于2013年12月3日至12月28日进行,试验期间日最大光照强度范围为198~612 μmol·m⁻²·s⁻¹,日均最高温为18.0℃,最低温为-4.0℃。试验选取口径为27 cm、高为25 cm的底部无洞花盆为水培容器,以直径为25 cm挤塑板为种植载体,每个植物处理设置4个重复,以不种植植物的水体为空白对照(CK),试验期间每天通过添加蒸馏水补充由于蒸发、植物蒸腾损失的水分。

1.2.3 测定项目

水体测定:试验进入处理阶段后,温暖季节试验每4 d取一次水样,寒冷季节试验每5 d取一次水样(暖季型植物生长速度快于冷季型植物,取样间隔设

置得稍短),每次取水样15 mL(取样前对水体进行搅动,保证其混合均匀),并在24 h内完成水样测定工作。测定的指标包括TN、TP及COD,根据国家环保总局发布的《水和废水检测分析方法》,分别采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、钼锑抗分光光度法和重铬酸钾法进行测定^[18]。

植物样品:将植株分为水上和水下两部分(即以挤塑板载体为分割线分为根系与茎叶两部分),称得初始和结束时鲜重后将植株样品置于烘箱中105℃杀青30 min,随后在75℃下烘干至恒重,称得其初始和结束时干重,最后测定植株的氮磷含量^[19]。

1.2.4 数据处理

生物量变化=结束生物量-初始生物量

植株氮(磷)积累量的贡献率=植株氮(磷)积累量/系统氮(磷)去除总量×100%

植物对富营养水体中污染物的去除率^[19-21]:

$$W_i = (C_0 - C_i) / C_0 \times 100\%$$

式中:W_i为第i天污染物的总去除率;C₀为初始污染物浓度;C_i为第i天时污染物的浓度。

采用SPSS 20.0对所测数据进行统计分析:温暖季节的狗牙根处理的水体和对照水体间的比较采用配对样本T检验,寒冷季节不同多花黑麦草处理的水体和对照水体间采用Duncan法进行单因素方差分析。采用Excel 2010制图。

2 结果与分析

2.1 不同植物在重度富营养水体中的生长状况

如表2所示,温暖季节的试验结束后,Tifton 85狗牙根的总鲜重增加量达1 303.1 g·m⁻²,水上部分的干重增加量占总增加量的比值达83.7%,远大于水下

表2 不同季节试验植物在重度富营养水体中生物量的变化

Table 2 Variation of plant biomass in heavily eutrophic water

生长季节 Growing season	材料 Plant	鲜重增加总量 Increase in total fresh weight/ g·m ⁻²	干重增加量/g·m ⁻² Increases in dry weight			占总干重比值/% Percentages of total dry weight	
			水上部 Above-water	水下部 Under-water	总值 Total	水上部 Above-water	水下部 Under-water
温暖季节 Warm season	Tifton 85 狗牙根 <i>C. dactylon</i> Tifton 85	1303.1±61.9	276.5±7.0	54±8.2	330.5±22.3	83.7±2.0	16.3±2.0
寒冷季节 Cold season	特高多花黑麦草 <i>L. multiflorum</i> Tetragold	834.2±21.4a	92.3±4.4a	36.4±2.3a	128.6±6.3a	71.7±0.8	28.3±0.8
	美克斯多花黑麦草 <i>L. multiflorum</i> Maximus	737.7±21.4b	83.7±4.7b	30.3±4.0b	114.0±3.7b	73.5±3.4	26.5±3.4
	剑宝多花黑麦草 <i>L. multiflorum</i> Jumbo	833.4±18.9a	91.0±2.9a	35.1±1.1a	126.1±2.8a	72.2±1.0	27.8±1.0

注:“寒冷季节”同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters within a column under cold season indicate significant difference at the 0.05 level.

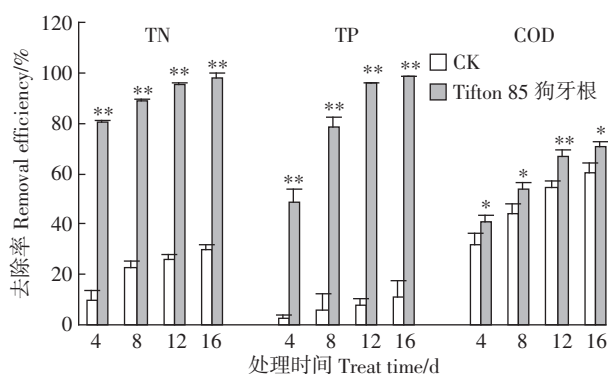
部分所占比值。寒冷季节试验结束后,三种多花黑麦草的总鲜重增加范围在 737.7~834.2 g·m⁻² 内,依次为特高>剑宝>美克斯,单位面积干重增加范围在114.0~128.6 g·m⁻² 内,依次为特高>剑宝>美克斯,特高与剑宝的生物量增加值均显著高于美克斯($P<0.05$)。三种多花黑麦草水上部分的干重增加量占总增加量的比值达 71.0%以上,远大于水下部分所占比值。

2.2 温暖季节 Tifton 85 狗牙根对水体中营养物质的净化效果

温暖季节试验水体中 TN、TP 及 COD 的去除结果如图 1 所示。

处理 4 d 后, Tifton 85 狗牙根对水体中 TN 的去除率已高达 80.4%, 随着水体中 TN 浓度的降低, 去除率增加量趋于缓慢, 但整个过程 Tifton 85 狗牙根的去除效果均显著优于空白对照($P<0.01$)。处理 16 d 后, Tifton 85 狗牙根对 TN 去除率达 98.2%, TN 的浓度从 25.82 mg·L⁻¹ 降至 0.46 mg·L⁻¹ (数据未列出, 下同), 已低于轻度富营养的评价指标(1.0 mg·L⁻¹), 达到非富营养化水体标准, 而对照水体中 TN 的浓度仍处于重度富营养化水平。

处理 4 d 后, Tifton 85 狗牙根对水体中 TP 的去除率达 48.4%, 处理 8 d 后, 去除率达 78.2%, 随着水体中 TP 浓度的降低, 去除率增加量趋于缓慢, 但整个过程 Tifton 85 狗牙根的去除效果均显著优于空白对照($P<0.01$)。处理 16 d 后, Tifton 85 狗牙根对 TP 去除率达 98.3%, TP 的浓度从 2.53 mg·L⁻¹ 降至 0.04



图中 * 和 ** 分别表示 Tifton 85 狗牙根处理的水体与对照水体间达到显著差异($P<0.05$)和极显著差异($P<0.01$)

*and** indicate significant difference between *C. dactylon* Tifton 85 and CK at the 0.05 and 0.01 level, respectively

图 1 Tifton 85 狗牙根处理与对照水体中 TN、TP 及 COD 的去除率比较

Figure 1 Comparisons of TN, TP and COD removal efficiencies between *C. dactylon* and CK

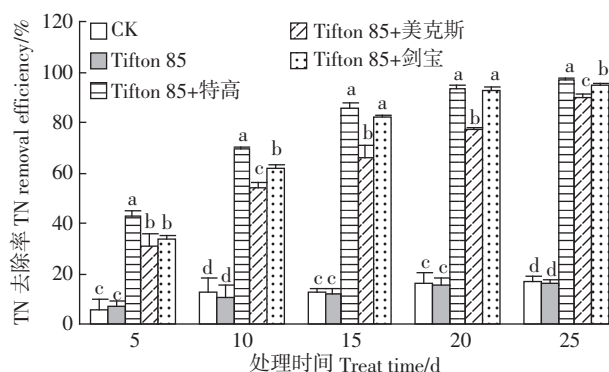
mg·L⁻¹ (图 1), 已低于轻度富营养的评价指标(0.1 mg·L⁻¹), 达到非富营养化水体标准, 而对照水体中 TP 浓度仍处于重度富营养化水平。

处理 4 d 后, Tifton 85 狗牙根对水体中 COD 的去除率达 41.1%, 随后去除率增加量趋于缓慢, 但整个过程 Tifton 85 狗牙根对水体中 COD 的去除率均显著高于空白对照($P<0.05$)。处理 16 d 后, Tifton 85 狗牙根对 COD 去除率达 70.7%, COD 的浓度从 63.2 mg·L⁻¹ 降至 19.0 mg·L⁻¹, 即降至中度富营养化水平, 而对照水体中 COD 浓度为 25.0 mg·L⁻¹, 仍处于重度富营养化水平。

2.3 寒冷季节多花黑麦草对水体中营养物质的净化效果

寒冷季节试验水体中 TN 去除效果如图 2 所示, 盖播了多花黑麦草的处理对 TN 的去除率一直显著高于未进行盖播的 Tifton 85 狗牙根及空白对照水体($P<0.05$), 且未进行盖播的 Tifton 85 狗牙根和空白对照间无显著差异。处理 5 d 后, 盖播的不同多花黑麦草品种对水体 TN 的去除率依次为特高>剑宝>美克斯, 特高的净化能力显著优于剑宝和美克斯。随着试验进行, 特高的净化能力一直处于领先水平, 处理 25 d 后, 其处理的水体中 TN 浓度从 27.07 mg·L⁻¹ 降至 0.86 mg·L⁻¹, 已低于轻度富营养的评价指标(1.0 mg·L⁻¹), 达到非富营养化水体浓度; 美克斯和剑宝分别为 2.7、1.4 mg·L⁻¹, 并未低于轻度富营养评价指标, 属于轻度富营养浓度。

寒冷季节试验水体中 TP 去除效果如图 3 所示。



图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level. The same below

图 2 不同品种多花黑麦草对水体中 TN 的去除率比较

Figure 2 Comparisons of TN removal efficiencies of different *L. multiflorum*

盖播多花黑麦草的处理对 TP 的去除率一直显著高于未进行盖播的 Tifton 85 狗牙根及空白对照水体 ($P<0.05$),且未进行盖播的 Tifton 85 狗牙根和空白对照间无显著差异。处理 5 d 后,盖播的不同多花黑麦草品种对水体 TP 的去除率无显著差异,处理 10 d 后产生差异,特高与剑宝对 TP 的去除率显著高于美克斯 ($P<0.05$),且特高的净化能力一直处于领先水平。处理 25 d 后,特高处理的水体中 TP 浓度从 $2.81\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,美克斯和剑宝处理的水体分别降至 0.50 、 $0.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均已低于中度富营养的评价指标 ($0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),达到轻度富营养水体标准。

寒冷季节试验水体中 COD 去除效果如图 4 所示。处理 5 d 后,盖播不同品种多花黑麦草的处理对水体 COD 的去除率虽无显著差异,但均显著高于未进行盖播的 Tifton 85 狗牙根及空白对照水体 ($P<0.05$)。随着水体中 COD 浓度的降低,去除率增加量趋于缓慢,整个过程不同多花黑麦草品种间几乎无差异。处

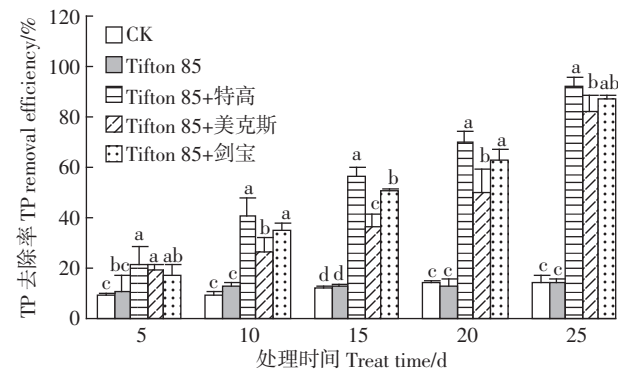


图 3 不同品种多花黑麦草对水体中 TP 去除率的比较
Figure 3 Comparisons of TP removal efficiencies of different *L. multiflorum*

理 25 d 后,三种黑麦草对 COD 去除率均达 68.0%以上,其浓度从 $54.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $15.83\sim 17.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而未盖播的 Tifton 85 狗牙根及对照水体中 COD 浓度分别为 22.4 和 $21.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.4 不同植物对氮、磷的积累对比

供试植物在重度富营养化水体中氮、磷积累情况见表 3。温暖季节的试验结束后,Tifton 85 狗牙根对氮、磷的积累总量分别为 $2\,461.2$ 、 $213.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,植株氮、磷总积累量对系统总去除量贡献率达 97.2%和 85.8%,其中水上部分贡献率达 80.2%和 63.7%,远大于水下部分的贡献率。寒冷季节试验结束后三个多花黑麦草对氮、磷的积累总量范围分别为 $1\,877.1\sim 2\,191.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $199.0\sim 253.7\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,其中特高与剑宝的氮、磷积累量显著高于美克斯 ($P<0.05$),植株氮、磷总积累量对系统总去除量贡献率分别达 76.0%和 84.0%以上,水上部分贡献率达 60.0%和 61.0%以上,

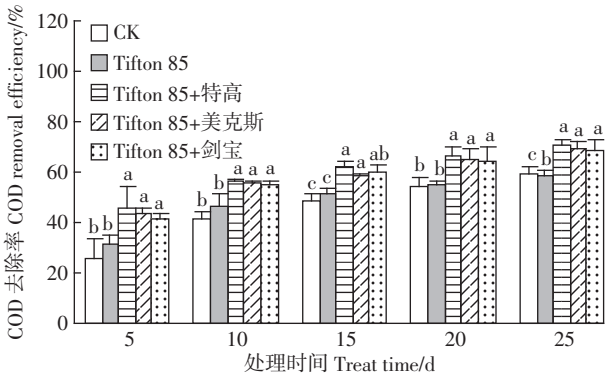


图 4 不同品种多花黑麦草对水体中 COD 的去除率比较

Figure 4 Comparisons of COD removal efficiencies of different *L. multiflorum*

表 3 4 种植物氮磷积累量
Table 3 Nitrogen and phosphorus accumulation in four plants

指标 Index	材料 Plant	积累量 Accumulation/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$			贡献率 Contribution rates/%		
		水上部 Above-water	水下部 Under-water	总值 Total	水上部 Above-water	水下部 Under-water	总值 Total
氮 Nitrogen	Tifton 85 狗牙根 <i>C. dactylon</i> Tifton 85	2 031.1 $\pm$ 119.6	430.2 $\pm$ 72.6	2461.2 $\pm$ 9.4	80.2 $\pm$ 5.4	17.0 $\pm$ 3.0	97.2 $\pm$ 6.5
	特高 <i>L. multiflorum</i> Tetragold	1 763.3 $\pm$ 45.6a	427.7 $\pm$ 56.9a	2 191.0 $\pm$ 69.0a	67.3 $\pm$ 2.2a	16.3 $\pm$ 2.1a	83.6 $\pm$ 3.0a
	美克斯 <i>L. multiflorum</i> Maximus	1 486.7 $\pm$ 91.6b	390.4 $\pm$ 27.0a	1 877.1 $\pm$ 81.2b	60.7 $\pm$ 4.1b	15.9 $\pm$ 1.1a	76.7 $\pm$ 3.8b
	剑宝 <i>L. multiflorum</i> Jumbo	1 778.6 $\pm$ 46.7a	411.4 $\pm$ 28.0a	2 190.0 $\pm$ 72.1a	69.4 $\pm$ 2.3a	16.1 $\pm$ 1.2a	85.5 $\pm$ 3.4a
磷 Phosphorus	Tifton 85 狗牙根 <i>C. dactylon</i> Tifton 85	158.4 $\pm$ 5.4	54.8 $\pm$ 4.7	213.2 $\pm$ 9.4	63.7 $\pm$ 3.0	22.0 $\pm$ 2.1	85.8 $\pm$ 4.7
	特高 <i>L. multiflorum</i> Tetragold	188.8 $\pm$ 4.1a	64.9 $\pm$ 2.3a	253.7 $\pm$ 5.8a	73.0 $\pm$ 3.6a	25.1 $\pm$ 1.0a	98.2 $\pm$ 4.4a
	美克斯 <i>L. multiflorum</i> Maximus	146.1 $\pm$ 12.7b	52.9 $\pm$ 4.4b	199.0 $\pm$ 8.9c	61.9 $\pm$ 1.8b	22.6 $\pm$ 3.8a	84.5 $\pm$ 4.1b
	剑宝 <i>L. multiflorum</i> Jumbo	181.1 $\pm$ 2.9a	58.0 $\pm$ 2.4b	239.1 $\pm$ 2.8b	74.3 $\pm$ 2.1a	23.8 $\pm$ 0.7a	98.0 $\pm$ 1.7a

注:三个多花黑麦草品种不同指标同列数据不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters within a column indicate significant difference between ryegrasses at the 0.05 level.

均远大于水下部分的贡献率。

3 讨论

金树权等^[22]在比较 10 种水生植物对水体的净化效果后指出,植物的净增生物量是决定植物水质净化效果的一个重要因素。Zhu 等^[23]对水体净化过程中植物的生物积累量进行了研究,表明水上部分比重越大越有利于通过收割达到净化水体的目的。本研究中供试植物生物量明显增加,水上部分干重增加量占总干重变化值的比率均在 70%以上,有利于通过收割将植物同化的营养物质带离水体。同时所用植物均为优质牧草,其全年的持续性收割,既可修复水体,又可为食草动物全年度提供优质的青饲料,达到了环境效益与经济效益的良性结合^[5]。

Kansiime 等^[24]研究指出,在富营养化的污染水体中种植植物后显著提高了水体中营养物质的去除率。本研究中两个季节试验水体中 TN、TP 的浓度多表现为试验前期大幅度下降,其浓度降至很低的水平,所选的供试植物可在高浓度的富营养水体中快速吸收营养物质,起到良好的净化效果;随着水体中营养物质浓度的快速降低,植物吸收速率降低,与常会庆等^[25]的研究中试验前期水体 TN 浓度急剧下降,随后平缓下降的趋势相吻合。Montemurro 等^[26]的研究结果也表明,植物对某种营养物质的吸收利用率与其供应浓度有关。Epstein 教授和他的团队用 Michaelis-Menten 方程描述离子的运输,虽不同植物对不同离子的亲和力不同,但离子浓度与吸收速率之间的吸收动力学曲线均表明,在一定范围内,植物吸收离子的速度随介质中浓度的升高而升高,浓度降低则吸收速率亦降低^[27-28]。温暖季节选用的 Tifton 85 狗牙根对重度污染水体处理 16 d 后,水体中的 TN 和 TP 的去除率均高达 98.0%以上,显著高于对照水体,使 TN、TP 均降至非富营养化浓度,表现出优异的净化效果。寒冷季节所用的 3 个多花黑麦草品种的去除效果也显著地优于空白对照,综合 TN 和 TP 的去除率,可知特高多花黑麦草的净化效果最好,处理重度富营养水体 25 d 后,使得水体达到非富营养化标准,而剑宝与美克斯处理的重度富营养水体 25 d 后降至轻度富营养水平。

本研究中试验前期处理水体中 COD 下降速度最快,随后速度减弱,趋于平缓,表明在经历前期较好的净化时段后,水体中剩余一部分较难去除的有机物质。这与 Vymazal 等^[29]的研究相符,即污染水体

中含有较多不稳定易于降解的有机物和少部分不易于降解的有机物。虽然不同季节植物、不同植物品种对重度富营养水体中 COD 的去除效果几乎无显著差异,但植物处理后可将处理水体中 COD 浓度降至中度富营养水体标准,而空白对照仍处于重度富营养化水平。这与人的一些相关研究中提到植物处理的水体中 COD 去除率显著高于空白对照水体一致^[30-31]。

Vymazal 等^[29]研究了不同的种植方式对营养物质去除的影响,表明漂浮的种植方式中植物吸收对氮磷的去除所起的作用最大。Huett 等^[32]研究表明植株对氮磷的积累量分别占系统去除总量的 76%和 86%。蒋跃平等^[33]研究了观赏水体中植物吸收对系统氮磷去除的贡献率,结果表明供试植物平均氮磷积累量对水中氮磷去除的贡献率分别为 46.8%和 51.0%。本研究采用漂浮的种植方式,至试验结束,不同植物对系统 TN 和 TP 去除量的贡献率范围分别为 76.7%~97.2%和 84.5%~98.2%,表明植物对氮磷的积累在净化系统中起到关键性作用。目前也有一些漂浮植物对水体净化效果较为理想的报道,如凤眼莲、浮萍、满江红等,但多数经济价值不高,同时其水域生长面积不易于控制,可能会大量繁殖,封闭水面环境,对水中原有动植物的生境造成侵害,且浮生叶片不易于打捞收割,若打捞收割不及时其叶片的死亡与腐烂分解会对水体造成二次污染^[34-35]。另外,研究的植物多集中在温暖季节,缺乏冷暖季节对接技术,一旦进入低温季节,水体净化便发生中断。本研究利用牧草轮作实现了水体的全年净化,长势迅速、净化效果优异的陆生牧草因人工漂浮种植,可以有效地控制其所在的水域面积和形状,且牧草的可持续性收割能及时将营养物质带离水体,并快速地进入畜牧业应用环节,实现了净化与经济的良性结合。

4 结论

本研究中供试植物的净化效果显著优于对照,其中,暖季型的 Tifton 85 狗牙根处理的重度富营养水体中的 TN、TP 均由重度富营养降至非富营养化浓度, COD 由重度富营养降至中度富营养浓度。盖播的 3 个冷季型多花黑麦草品种对 TN 和 TP 的去除率存在显著差异,特高表现最好,其处理的水体中 TN、TP 均由重度富营养降至非富营养化浓度,品种间 COD 去除率虽无显著差异,但也均降至中度富营养浓度。暖季型的 Tifton 85 狗牙根净化效果优异,寒冷型的特高

多花黑麦草净化效果最好。Tifton 85 和特高可作为长三角地区周年水体净化的优异牧草组合进行推广。

参考文献:

- [1] Sierp M T, Qin J G, Recknagel F. Biomanipulation: A review of biological control measures in eutrophic waters and the potential for Murray cod *Maccullochella peelii peilii* to promote water quality in temperate Australia[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2009, 19(2): 143–165.
- [2] Li W, Recknagel F. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: Preliminary results from growth chamber experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 90(1): 9–15.
- [3] 耿兵, 张燕荣, 王妮珊, 等. 不同水生植物净化污染源水体的试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 538–553.
- GENG Bing, ZHANG Yan-rong, WANG Ni-shan, et al. Effects of hydrophytes on the purification of polluted water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 538–553.
- [4] 刘自学. 中国草业的现状与展望[J]. *草业科学*, 2002, 19(1): 6–8.
- LIU Zi-xue. Present situation and prospect of Chinese grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2002, 19(1): 6–8.
- [5] 何玲玲. 六种草种耐生活污水的适应性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- HE Ling-ling. Studies on the tolerance of sewage stress with six grass species[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009.
- [6] 黄春琼, 张永发, 刘国道. 狗牙根种质资源研究与改良进展[J]. *草地学报*, 2011, 19(3): 531–538.
- HUANG Chun-qiong, ZHANG Yong-fa, LIU Guo-dao. Research and improvement in germplasm resources of *Cynodon dactylon*[J]. *Acta Agraria Sinica*, 2011, 19(3): 531–538.
- [7] 刘建秀, 郭爱桂, 郭海林. 我国狗牙根种质资源形态变异及形态类型划分[J]. *草业学报*, 2004, 12(6): 99–104.
- LIU Jian-xiu, GUO Ai-gui, GUO Hai-lin. Morphological variation and types of *Cynodon dactylon*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 12(6): 99–104.
- [8] Fonseca A F, Melfi A J, Monteiro F A, et al. Treated sewage effluent as a source of water and nitrogen for Tifton 85 bermudagrass[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 328–336.
- [9] Nogueira S F, Pereira B F F, Gomes T M, et al. Treated sewage effluent: Agronomical and economical aspects on bermudagrass production[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 151–159.
- [10] 周小平, 徐晓峰, 王建国, 等. 3种植物浮床对冬季富营养化水体氮磷的去除效果研究[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 102–104.
- ZHOU Xiao-ping, XU Xiao-feng, WANG Jian-guo, et al. Nitrogen and phosphorus removal performance by three planted floats in eutrophic water bodies in winter[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(4): 102–104.
- [11] 徐晓峰, 史龙新, 许海, 等. 水培经济植物对污水中磷的吸收利用及去除效果[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(4): 383–388.
- XU Xiao-feng, SHI Xin-long, XU Hai, et al. Effects of aqua-cultured economic plants on phosphorus removal from sewage[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(4): 383–388.
- [12] 张志勇, 冯明雷, 杨林章, 等. 人工模拟污水净化系统去除生活污水氮、磷效果的比较研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 466–475.
- ZHANG Zhi-yong, FENG Ming-lei, YANG Lin-zhang, et al. Comparative study on efficiency of simulated constructed wetlands removing nitrogen and phosphorus from domestic sewage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 466–475.
- [13] 胡锦好, 袁菊红, 张玲, 等. 不同品种黑麦草对富营养化水体净化能力的比较[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(8): 1740–1749.
- HU Mian-hao, YUAN Ju-hong, ZHANG Ling, et al. Comparative studies on the purification ability of different kinds of ryegrass (*Lolium L.*) in a eutrophic waterbody[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(8): 1740–1749.
- [14] Ding Z, Golan-Goldhirsh A, Rafiq M K, et al. Purification of eutrophic water by ryegrass[J]. *Water Science & Technology*, 2012, 66(10): 2138–2145.
- [15] Read J J, Sistani K R, Oldham J L, et al. Double-cropping annual ryegrass and bermudagrass to reduce phosphorus levels in soil with history of poultry litter application[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84(1): 93–104.
- [16] 赵凤亮. 高效净化富营养化水体能源植物的筛选及其生理生态基础[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- ZHAO Feng-liang. Screening bioenergy plants for remediation of eutrophic water and ecophysiological characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [17] 中华人民共和国水利部. SL 395—2007 地表水资源质量评价技术规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- Ministry of Water Resources the People's Republic of China. SL 395—2007 Technological regulations for surface water resources quality assessment[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版, 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 701–705.
- State Environmental Protection Administration. Methods for the monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 701–705.
- [19] 刘晓丹, 李军, 龚一富, 等. 5种水培植物对富营养化水体的净化能力[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(7): 2607–2612.
- LIU Xiao-dan, LI Jun, GONG Yi-fu, et al. Purification of eutrophic water by five aqua-cultured plants[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(7): 2607–2612.
- [20] 韩冠苒. 鸢尾属3种植物对富营养化水体净化及生理响应[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- HAN Guan-ran. Three Iris species's purification effects on eutrophic water and the physiological response[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [21] Chung A K C, Wu Y, Tam N F Y, et al. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32(1): 81–89.
- [22] 金树权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8): 1571–1575.
- JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, ZHU Xiao-li, et al. Comparison of ni-

- trogen and phosphorus uptake and puripication ability of ten aquatic macrophytes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1571-1575.
- [23] Zhu L, Li Z, Ketola T. Biomass accumulations and nutrient uptake of plants cultivated on artificial floating beds in China's rural area[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1460-1466.
- [24] Kansime F, Oryem-Origa H, Rukwago S. Comparative assessment of the value of papyrus and cocoyams for the restoration of the Nakivubo wetland in Kampala, Uganda[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2005, 30(11): 698-705.
- [25] 常会庆, 寇太记, 乔鲜花, 等. 几种植物去除污染水体中养分效果研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 118-122.
- CHANG Hui-qing, KOU Tai-ji, QIAO Xian-hua, et al. Removal efficiency of nutrients from wastewater by several plants[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5): 118-122.
- [26] Montemurro F, Convertini G, Ferri D. Nitrogen application in winter wheat grown in mediterranean conditions: Effects on nitrogen uptake, utilization efficiency, and soil nitrogen deficit[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2007, 30(10): 1681-1703.
- [27] 李春俭. 高级植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 77-78.
- LI Chun-jian. Mineral nutrition of higher plants[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008: 77-78.
- [28] Marschner F. Mineral nutrition of higher plants[M]. 3rd edition. Beijing: Science Press, 2013: 31-32.
- [29] Vymazal J, Kröpfelová L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 3911-3922.
- [30] Villaseñor J, Mena J, Fernández F J, et al. Kinetics of domestic wastewater COD removal by subsurface flow constructed wetlands using different plant species in temperate period[J]. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, 2011, 91(7-8): 693-707.
- [31] 李艳蕾, 李兆华, 姜应和, 等. 不同芹菜浮床对富营养化水体净化效果研究[J]. *水处理技术*, 2011, 37(10): 66-70.
- LI Yan-qiang, LI Zhao-hua, JIANG Ying-he, et al. Purification effect of different celery floating bed on eutrophical water[J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 37(10): 66-70.
- [32] Huett D O, Morris S G, Smith G, et al. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands[J]. *Water Research*, 2005, 39(14): 3259-3272.
- [33] 蒋跃平, 葛 滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. *生态学报*, 2004, 24(8): 1720-1724.
- JIANG Yue-ping, GE Ying, YUE Chun-lei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1720-1724.
- [34] 胡雪峰, 陈振楼, 高效江. 入冬水生高等植物的衰亡对河流水质的影响[J]. *上海环境科学*, 2001, 20(4): 184-187.
- HU Xue-feng, CHEN Zhen-lou, GAO Xiao-jiang. Effect of aquatic higher plants withering through winter on water quality of creeks[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2001, 20(4): 184-187.
- [35] 葛绪广. 凤眼莲凋落物和残体及其对水环境的影响[D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- GE Xu-guang. Litter and residue of *Eichhornia crassipes* (Mart.) S influence on water environment[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2006.