

不同草本植被过滤带对径流中氮磷的生态阻控效果

徐 晗¹, 鄢紫薇¹, 胡荣桂¹, 谢 翰¹, 郑志杰¹, 冯明磊², 郑 勇², 王 砚¹, 林 杉¹

(1.华中农业大学资源与环境学院, 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070;
2.中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051)

摘要: 为明确在不同条件下植被过滤带对地表径流氮、磷的阻控规律, 分别构建百慕大、马尼拉、高羊茅、玉龙草等 4 种植被过滤带和裸地对照组过滤带, 通过模拟 3 种污染物浓度和 3 种水力负荷强度的径流, 探讨不同草本植被过滤带对表流和渗流中的氮、磷的阻控效果。结果表明, 与对照组相比, 植被过滤带显著提高土壤系统对径流以及来水中的氮、磷等污染物的拦截能力, 在 3 种水力负荷强度下, 百慕大、马尼拉、高羊茅、玉龙草和裸地对照组的平均径流拦截率分别为 56.10%, 54.28%, 63.16%, 60.53% 和 39.10%, 4 种植被的径流拦截率均显著高于对照组 ($p < 0.05$); 4 种植被覆盖均显著降低表渗流量比, 提高土壤的入渗能力; 水力负荷强度的提高降低植被过滤带对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的去除效率, 但植被过滤带去除率降低的幅度小于对照组; 在一定范围内, 渗流中 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 的去除率随着来水中氮、磷浓度增加而提高; 在一定的水力负荷下, 根冠比越低的植被削减径流的能力越强。

关键词: 植被过滤带; 径流; 污染负荷; 氮拦截率; 磷拦截率

中图分类号: X52; S157 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2022)06-0140-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.018

Ecological Control Effect of Different Herbaceous Vegetative Filter Belts on Nitrogen and Phosphorus in Runoff

XU Han¹, YAN Ziwei¹, HU Ronggui¹, XIE Han¹, ZHENG Zhijie¹,
FENG Minglei², ZHENG Yong², WANG Yan¹, LIN Shan¹

(1.Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze

River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Recourses and Environment, Huazhong

Agricultural University, Wuhan 430070; 2.Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051)

Abstract: In order to clarify the blockage and control law of nitrogen and phosphorus in simulated runoff under different conditions, five vegetative buffer strips were constructed with control, *Cynodon dactylon*, *Zoysia matrella*, *Festuca elata* and *Ophiopogon japonicus*, and the blockage and control effects on nitrogen (N) and phosphorus (P) in surface flow and seepage were explored by simulating runoff with different pollutant concentrations. The results showed that compared with the control, the vegetative buffer strips significantly improved the interception ability of the soil system on runoff and pollutants such as nitrogen and phosphorus in the incoming water, and the average runoff reduction rates of the filter strips of *Cynodon dactylon*, *Zoysia matrella*, *Festuca elata*, *Ophiopogon japonicus* and the control group were 56.10%, 54.28%, 63.16%, 60.53% and 39.10% respectively under three hydraulic load intensities. The runoff reduction rates of all four plantings were significantly higher than those of the control ($p < 0.05$). All four plantings significantly reduced the surface infiltration ratio and improved the infiltration capacity of the soil. The increase in hydraulic load intensity reduced the removal efficiency of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and total P (TP) in the vegetated filter zone, but the reduction in the removal rate of the vegetated treatment was less than that of the control. Within a certain range, the removal rates of total N (TN), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and TP in the seepage increased with the increase of N and P concentrations in the incoming water. Under a certain hydraulic load,

收稿日期: 2022-04-13

资助项目: 武汉市科技计划项目(2020020601012284); 国家重点研发计划项目(2021YFD1901202); 云南省科技人才与平台计划项目(202205AF150004)

第一作者: 徐晗(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事湖岸带面源污染阻控研究。E-mail: 1778967364@qq.com

通信作者: 林杉(1981—), 男, 副教授, 主要从事农业面源污染阻控研究。E-mail: linsan@mail.hzau.edu.cn

the vegetative with low root to shoot ratio has a stronger ability to reduce runoff.

Keywords: vegetative filter strips; runoff; pollution load; nitrogen removal rate; phosphorus removal rate

随着我国城镇化建设、农业开发、畜牧养殖业的发展,大量的氮磷等营养物质、农药通过地表径流、农业排水等面源污染途径输入到自然水体,使得湖泊、河流等水体的水质恶化和富营养化问题日趋严重^[1]。为了减少地表水体所受的外部污染,对地表径流进行截留拦截是关键控制途径^[2]。因此,建立生态缓冲带拦截面源污染是一项有效的管理措施,对维护水体生态系统健康至关重要。

作为生态缓冲带的一种,植被过滤带(vegetative filter strips, VFS)是指在潜在污染源与受纳水体之间的带状植被拦截或过滤的区域^[3],因其在面源污染阻控方面有着显著效果而备受关注。早期在欧洲、美国等地区有较多相关报道,有研究^[4]表明,植被过滤带可以截留地表径流中的泥沙、氮磷、农药等污染物。目前部分国家已经将植被过滤带列为防治水土流失和面源污染的重要措施之一,如加拿大安大略省将其列为防治水体污染的“最佳管理措施(best management practices, BMPs)”之一^[5]。

植被过滤带阻控污染物的机制包括滞留污染物、促进地表径流下渗、有机成分吸附污染物、植物根系吸收,以及土壤微生物降解等^[6],这些反应发生在表面径流与地下渗流 2 个过程中。早期国内外关于植被过滤带的研究^[7]主要集中在植被过滤带的长度、宽度和坡度等因素对地表径流截污效率的影响。近年来,研究者们重点关注了植被类型、覆盖度、植物生物量等因素对地表径流截污的影响^[8],尤其是对草本、林木等不同植被类型的过滤带对地表径流中污染物去除效率方面的研究更加关注。但是,这些研究的关注点多集中在植被过滤带对表面径流截污或是对地下渗流截污的某个单一过程,同时针对不同植被过滤带在表流与渗流 2 个过程中对氮磷等污染物的截留效率差异的研究较少。因此,本研究通过构建不同类型草本植被过滤带,分析其在不同水力负荷和不同污染负荷下对表流和渗流 2 个过程中污染物的截留效率,旨在为城市化背景下湖泊面源污染防控措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地位于华中农业大学环境工程基地,试验装置为 400 mm×1000 mm×400 mm 的镀锌铁皮土槽,土槽底部沿长度方向平行设置 3 根 PVC 多孔渗滤液导排管,其上铺设 1 层粒径为 16~32 mm 的砾石。试验土壤采自湖北省武汉市野芷湖边缓冲带(30°28′15″N,114°20′42″E),采集表层土壤(0—30 cm)并

去除植物根系、石子等杂质后均匀填入试验土槽中,使土壤厚度为 300 mm。土壤 pH 为 5.43,含水率为 21.51%,总氮含量为 1.44 g/kg,总碳含量为 10.89 g/kg,总磷含量为 1.36 g/kg,铵态氮含量为 3.50 mg/kg,硝态氮含量为 4.17 mg/kg。

选用武汉市地区常用于绿化及水土保持的 4 种草本植物:百慕大(*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers)、马尼拉(*Zoysia matrella*)、高羊茅(*Festuca elata*)和玉龙草(*Ophiopogon Japonicus* cv. nanus),4 种植物均生长迅速,并且耐阴耐旱,百慕大和高羊茅常用于植被过滤带的建设。4 种草本植物购自武汉市花木市场,草种于 2021 年 9 月播种至试验槽内进行培植,待生长至植被覆盖度达到 90%即展开试验研究。

试验模拟污水:污水由超纯水、氯化铵、硝酸钾、磷酸二氢钾等物质按不同污染负荷要求在实验室配置而成,根据国家地表水重度污染(GB 3838—2002)标准设置模拟污水的浓度梯度,低浓度的污染物浓度略高于标准中的 V 类水要求,各污染物浓度见表 1。

表 1 不同浓度污水各物质含量

单位:mg/L			
浓度	NH ₄ ⁺ —N	NO ₃ [—] —N	TP
低浓度	3	2	0.5
中浓度	6	4	1
高浓度	12	8	2

1.2 试验方法

1.2.1 试验过程

(1)草本植被过滤带在不同水力负荷强度下载污效果的试验。根据武汉市统计的 1971—1999 年的每小时最大降雨量的范围(23.7~102.1 mm/h),本试验设置 3 个不同坡面水力负荷强度分别为 0.72,1.44,2.16 m³/(m²·d),换算为降雨强度为 30,60,90 mm/h。试验时,将土槽坡度调整至 5°,使用喷头在土壤表面洒水,通过水量控制强度。进水污染负荷为中浓度(表 2),采用带有阀门的水桶控制污水流速。试验中表流量为从试验装置末端上方出水口流出的水量,渗流量为从试验装置末端下方渗滤管收集的水量。试验采用了 4 种草本植被过滤带,同时以裸地作为对照。

(2)草本植被过滤带对不同污染负荷条件下截污效果的试验。本试验设置 3 个不同进水污染负荷(表 2),控制坡面水力负荷强度为 1.44 m³/(m²·d)。试验过程与(1)相同。

1.2.2 指标测定 水质指标按照《土壤农业化学分析方法》^[9]中分析方法进行测定,总氮使用碱性过硫

酸钾消解紫外分光光度法测定,总磷使用钼酸铵分光光度法,铵态氮使用纳氏试剂分光光度法,水样硝态氮使用紫外分光光度法。植物生物量使用样方取样法称重,在试验开始前和结束后分别测定植物地上及地下部分的鲜重。土壤理化性质采用《土壤农化分析》^[10]分析方法进行测定。

1.3 数据处理与分析

使用污染物负荷削减率评价植被过滤带对污染物的拦截效果,使用径流拦截率评价植被过滤带对径流的拦截效果,其计算公式分别为:

表流污染物负荷削减率=(进水污染物浓度×进水量—表流出水污染物浓度×表流出水量)/(进水污染物浓度×进水量)×100%

渗流污染物负荷削减率=(进水污染物浓度×进水量—渗流出水污染物浓度×渗流出水量)/(进水污染物浓度×进水量)×100%

径流拦截率=(进水量—出水量)/(进水量)×100%

通过 Excel 2019 软件进行数据处理与制表,使用 SPSS 24.0 软件进行差异性分析,相关性热图由 R 软件的 Corrplot 包执行,使用 Origin 2021 软件进行绘图。

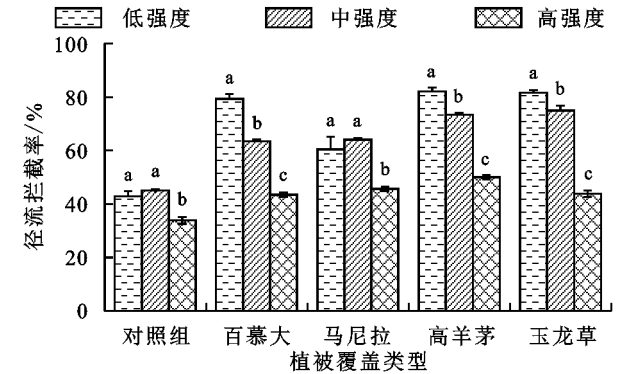
2 结果与分析

2.1 不同水力负荷下草本过滤带的截污效果

2.1.1 不同水力负荷下的径流拦截率 植被过滤带对不同水力负荷下的径流拦截率见图 1。植被过滤带的径流拦截率均比裸地对照组高。在低强度水力负荷下对照组的径流削减率为 42.92%,百慕大、马尼拉、高羊茅和玉龙草过滤带的径流拦截率分别为对照组的 1.85,1.41,1.91,1.90 倍;在中强度水力负荷下,玉龙草过滤带的径流拦截率为 74.98%,是对照组的 1.67 倍,百慕大、马尼拉和高羊茅过滤带分别为对照组的 1.41,1.42,1.63 倍;在高强度水力负荷下,高羊茅过滤带的径流拦截率为 50.07%,显著高于其他处理($p<0.05$),百慕大、马尼拉和玉龙草过滤带的径流拦截率分别是对照组的 1.28,1.35,1.29 倍。水力负荷的升高降低植被过滤带的径流削减效果,从低强度升至高强度时,对照组及马尼拉过滤带径流拦截率分别降低 21.04%和 24.42%($p<0.05$),百慕大、高羊茅和玉龙草 3 种植被过滤带的拦截率分别降低 45.20%,39.00%,46.29%。在低、中水力负荷下高羊茅和玉龙草的径流拦截率显著高于其他过滤带,而在高水力负荷下,除高羊茅外,其他过滤带的径流拦截率之间没有显著差异($p>0.05$)。

2.1.2 植被过滤带对 N 的去除 由图 2a 和图 2b 可知,4 种植被过滤带表流 TN 去除率显著高于对照组

($p<0.05$),随着水力负荷升高,对照组表流 TN 去除率先升高后下降,在低、中强度水力负荷下,百慕大、马尼拉、高羊茅和玉龙草过滤带的平均表流 TN 去除率分别为 89.58%,93.63%,92.07%,89.61%,水力负荷提高后,4 种植被过滤带的去除率分别下降至 67.92%,82.13%,73.84%,61.02%;在渗流过程中,随着水力负荷的增大,5 组过滤带的去除率变化规律并不明显,在 3 种水力负荷下,百慕大过滤带的渗流 TN 去除率均为最高。在低水力负荷下,百慕大和高羊茅过滤带的去除率分别为对照组的 1.88,1.82 倍;在中强度水力负荷下,高羊茅过滤带的去除率最高,百慕大过滤带次之,分别为对照组的 1.41,1.40 倍;在高水力负荷下,百慕大和马尼拉过滤带的平均去除率较高。



注:图中不同字母表示组间差异显著($p<0.05$)。

图 1 3 种水力负荷强度下不同类型植被过滤带径流拦截率特征

植被覆盖显著提高表流过程中对 NH_4^+-N 的去除,并且表流 NH_4^+-N 去除率随着水力负荷的提高而降低(图 2c、图 2d)。水力负荷由低强度到高强度,对照组、百慕大、马尼拉、高羊茅和玉龙草过滤带去除率分别下降 24.09%,11.43%,14.60%,20.30%,15.61%;对于渗流过程,水力负荷提高显著降低对照组的 NH_4^+-N 去除率,高强度时相比于低强度下降 42.97%,4 种植被过滤带的 NH_4^+-N 去除率显著高于对照组($p<0.05$),去除率为 83.17%~88.63%。在低水力负荷下,百慕大和高羊茅过滤带的平均 NH_4^+-N 去除率最高,达 95%以上;在中强度水力负荷下,玉龙草和百慕大过滤带的 NH_4^+-N 去除率较高,两者平均 NH_4^+-N 去除率均在 90%以上。

由图 2(e)和图 2(f)表明,对照组表流 NO_3^--N 去除率为 71.60%~83.77%,显著低于其他过滤带(82.85%~90.68%),水力负荷变化对表流 NO_3^--N 的去除没有显著影响;对照组渗流中 NO_3^--N 平均去除率为 40.95%,显著低于 4 个植被过滤带($p<0.05$),百慕大、马尼拉、高羊茅和玉龙草过滤带的平均渗流 NO_3^--N 去除率分别为 71.22%,67.81%,66.06%和 59.51%。在 3 种水力负荷下,百慕大过滤带的平均去除率均为最高,在低、中、高水力负荷下分别为对照组的 1.37,1.27,1.41 倍。

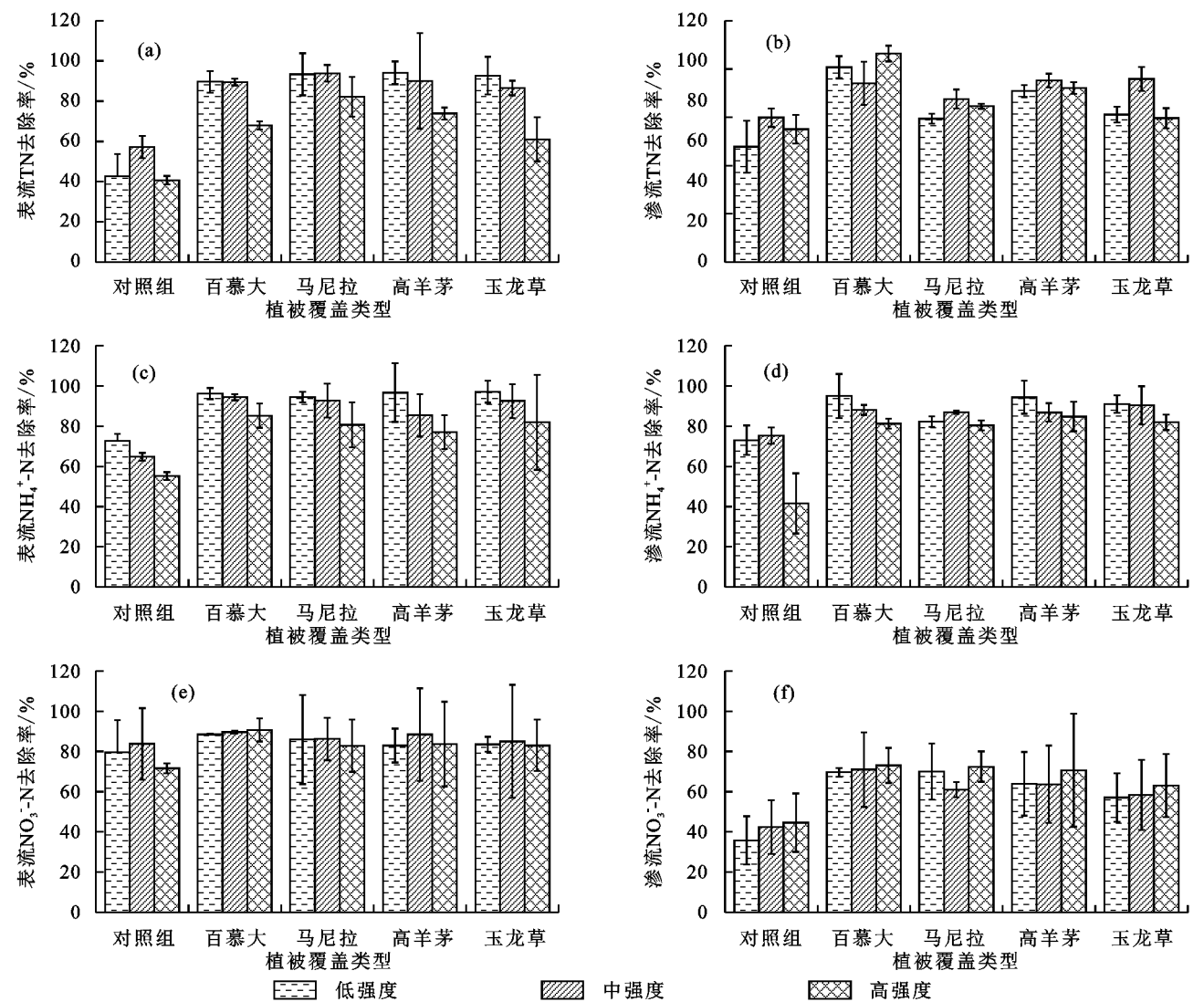


图 2 不同水力负荷下植被过滤带氮素去除率特征

2.1.3 植被过滤带对 P 的去除 由图 3 可知,在表流和渗流 2 个过程中,植被过滤带的 TP 去除率均显著高于裸地对照组。

随着水力负荷强度的提高,植被过滤带拦截 TP 的效率下降,当水力负荷从低强度提升到高强度,表

流过程中 5 组过滤带的 TP 去除率平均下降 19.76%,渗流过程 TP 去除率平均下降幅度为 18.08%。在低水力负荷下,TP 去除率较高的为高羊茅和百慕大过滤带;在中、高强度水力负荷下,TP 去除率较高的为马尼拉和高羊茅过滤带。

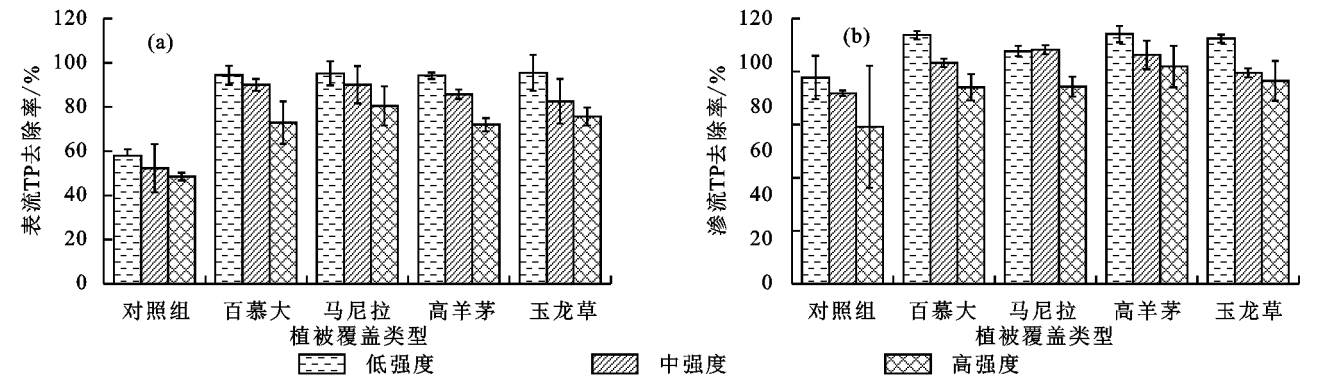


图 3 不同水力负荷强度下不同类型植被过滤带 TP 去除率特征

2.2 不同污染负荷下草本过滤带的截污效果

2.2.1 不同污染负荷下草本过滤带对 N 的去除效果 从图 4(a)、图 4(b)可以看出,不同植被过滤带对 TN 的去除效率有所不同。在 3 种污染负荷下,对照组表

流 TN 去除率分别为 65.00%,57.17%,70.79%,其他 4 种过滤带的去除率均显著高于对照组($p<0.05$);污染负荷增加会影响渗流 TN 去除率。在低污染负荷下,对照组对渗流中 TN 的去除率为 45.85%,其他 4 个处理的去

除率分别为 65.12%,61.84%,57.53%,62.73%;随着进水中 TN 浓度的升高,5 种过滤带渗流 TN 去除率呈现升高的趋势。百慕大过滤带在 3 种污染负荷下的平均 TN 去除率均为最高,在低、中、高污染负荷下其平均 TN 去除率为对照组的 1.40,1.45,1.19 倍,在表流中平均去除率为 90.60%,在渗流中平均去除率为 74.92%。

由图 4(c)、图 4(d)可知,在表面径流过程中,对照组在 3 种污染负荷下的去除率分别为 69.55%,72.34%和 52.39%,4 种植被过滤带的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率均显著高于对照组,4 种植被过滤带去除率为 88.35%~92.80%;在渗流过程中,对照组、百慕大、马尼拉、高羊茅和玉龙草过滤带 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为 87.63%,93.70%,92.46%,93.32%,94.41%。随着进水污染物浓度的增加,4 种植被过滤带渗流 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率没有显著变化($p>0.05$)。在低污染负荷下,玉龙

草和百慕大过滤带的平均 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率较高,分别是对照组的 1.17,1.16 倍;在中、高污染负荷下,百慕大和玉龙草过滤带平均 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率较高,分别为对照组的 1.26,1.25 倍。

从图 4(e)、图 4(f)可知,不同植被过滤带去除表流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的效率没有显著差异,5 组过滤带的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率在 81.38%~86.85%,并且进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对表流中其去除率没有显著的影响;污染负荷会影响植被过滤带对渗流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效率,5 组过滤带的渗流 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率均随着污染负荷增加而提高,其中高污染负荷下百慕大过滤带渗流 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率最高,为 88.47%。在 3 种污染负荷下,百慕大过滤带的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率均为最高,分别是对照组的 1.19,1.16,1.13 倍,马尼拉过滤带的去除效率次之,其去除率分别为对照组的 1.12,1.11,1.08 倍。

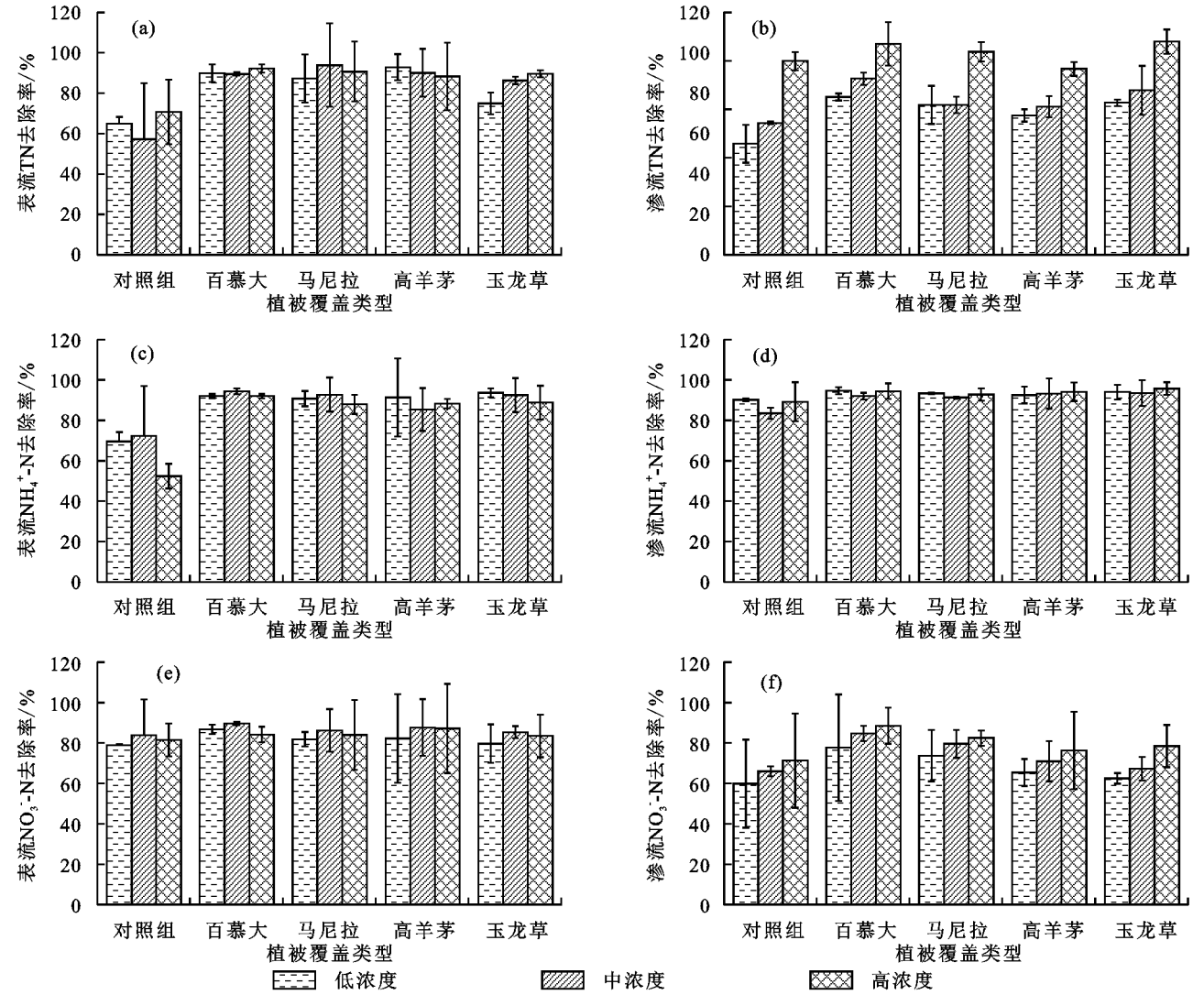


图 4 不同污染负荷下植被过滤带氮素去除率特征

2.2.2 不同污染负荷下草本过滤带对 P 的去除效果
由图 5 可知,在表流过程中,4 种植被过滤带 TP 去除率为 84.37%~93.85%,显著高于对照组,表流 TP 去除率与污染负荷关系并不显著;渗流中对照组平

均 TP 去除率为 71.05%,显著低于其他 4 个处理;随着污染负荷提升至最高,5 个过滤带平均渗流 TP 去除率相比低负荷分别提高 27.94%,8.62%,12.35%,20.57%,14.52%。百慕大和马尼拉过滤带在 3 种污

染负荷下的平均 TP 去除率较高,百慕大过滤带在低、中、高污染负荷下的 TP 去除率分别为对照组的

1.50,1.39,1.10 倍,马尼拉过滤带的 TP 去除率分别为对照组的 1.42,1.44,1.34 倍。

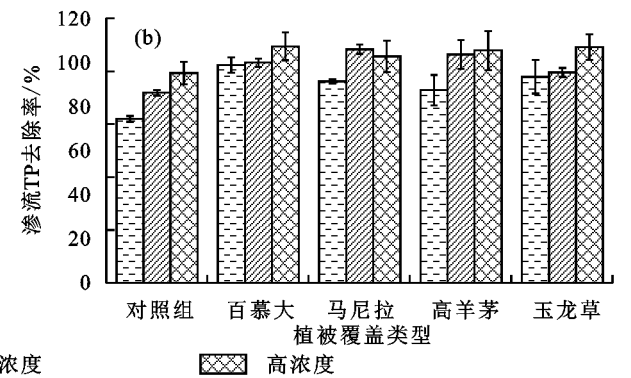
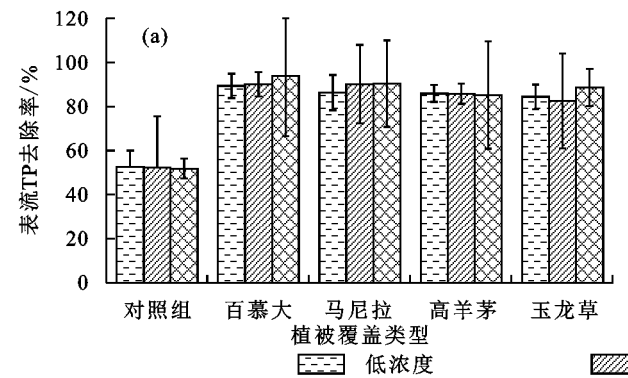


图 5 不同污染负荷下不同类型植被过滤带 TP 去除率特征

2.3 不同植被过滤带对地表径流的影响

2.3.1 不同植被过滤带对表流量与渗流量分配的影响 不同植被过滤带径流的拦截率及表流量与渗流量的分配情况见图 6。裸地对照组对径流的平均拦截率为 39.10%,百慕大、马尼拉、高羊茅和玉龙草过滤带的平均径流拦截率分别为 56.10%,54.28%,63.16%,60.53%,其中高羊茅过滤带径流拦截率显著高于其他 4 种过滤带($p<0.05$),植被覆盖使过滤带对地表径流拦截率显著提高($p<0.05$)。植被覆盖对过滤带表流量和渗流量的分配也产生影响,对照组的表流量和渗流量相当,平均表流出水量为 14.80 L,百慕大、马尼拉、高羊茅和玉龙草 4 个过滤带的表流量分别为 8.21,7.41,8.10,8.34 L,均显著低于对照组表流量($p<0.05$);对照组渗流量为 14.43 L,高羊茅过滤带和玉龙草过滤带的渗流量分别为 9.58,10.61 L,远低于对照组渗流量,百慕大过滤带的渗流量为 12.87 L,略低于对照组,而马尼拉过滤带的渗流量则与对照组持平,这说明不同植被覆盖对地表径流渗流的影响不同,其中百慕大和马尼拉植被有利于径流的下渗。

过滤带的表流量比呈上升趋势,说明在来水流量较大时植被过滤带对径流拦截的影响作用是有限的。

表 2 3 种水力负荷强度下不同过滤带的表渗流量比

处理	低强度	中强度	高强度
对照组	0.80±0.07a	1.15±0.08a	1.03±0.02a
百慕大	0.50±0.03b	0.38±0.02d	0.80±0.01c
马尼拉	0.24±0.05d	0.43±0.02d	0.64±0.01d
高羊茅	0.51±0.07b	0.65±0.08c	0.98±0.01b
玉龙草	0.38±0.08b	0.88±0.09b	0.82±0.02c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间存在显著差异($p<0.05$)。下同。

2.3.2 不同植被过滤带对径流中污染物截留的影响 从图 7 可以看出,植被过滤带可以提高系统整体对氮素的去除率,对于 3 种形态氮素,对照组的平均去除率均显著低于其他 4 个处理($p<0.05$),植被过滤带对 NH_4^+-N 的平均去除率最高,对 TN 的平均去除率低于 NH_4^+-N ,由于植物根系会释放有机氮等物质,可能导致 TN 浓度升高。4 种植被中百慕大过滤带对 3 种氮素的平均去除率均为最高,分别为对照组的 1.24,1.31,1.46 倍。4 种植被过滤带的平均 TP 去除率均显著高于对照组,其中百慕大和马尼拉过滤带的去除率略高于其他 2 种植被过滤带。4 种植被过滤带中,百慕大过滤带对氮、磷的平均去除率均为最高。

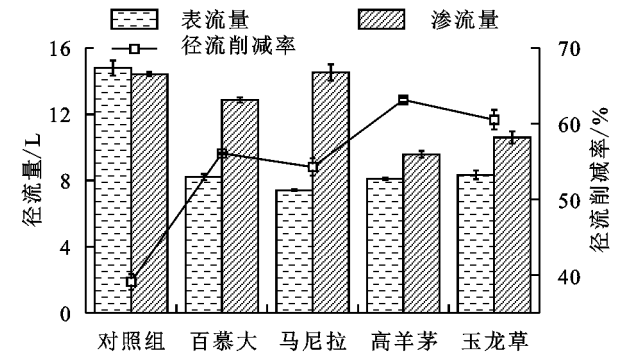


图 6 不同植被过滤带表流和渗流量及总径流拦截率

表渗流量比指植被过滤带表面径流出水量和下渗水量的比值,可以反映表流量和渗流量在植被渗滤系统中的分配情况,由表 2 可知,在不同的水力负荷强度下,植被覆盖均可以显著降低地表径流的表渗流量比($p<0.05$)。随着水力负荷强度的提高,4 种植被

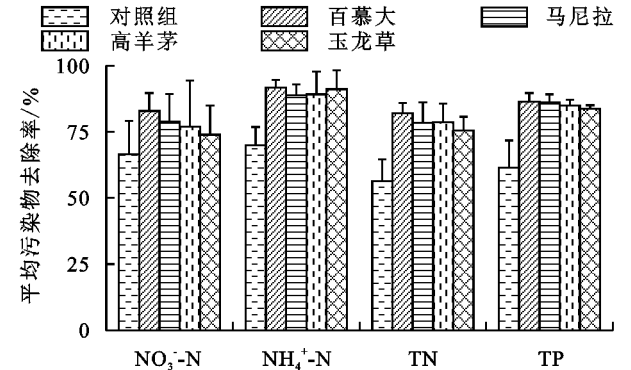


图 7 不同类型植被过滤带平均污染物去除率

2.4 径流拦截率与植物生物量的关系

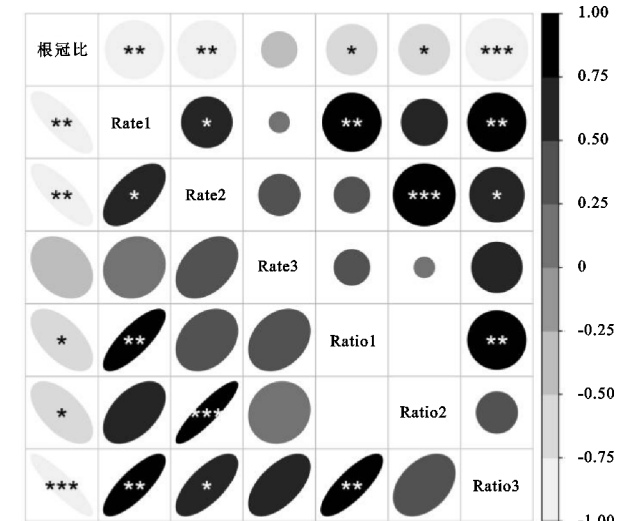
植物的生物量是构成生态系统生产力的组成成分,

一般分为地上生物量和地下生物量,植物的根冠比是地下生物量与地上生物量的比值,可以反映植物吸收养分的特征。4 种植物的生物量和根冠比列于表 3,4 种植物的地上生物量没有显著差异($p>0.05$),但百慕大和马尼拉的地下生物量较高,并且由表 2 可知,百慕大和马尼拉 2 种过滤带的表渗流量比显著低于其他处理,表明这 2 种植被过滤带的土壤渗透能力较好。

表 3 不同植物的生物量与根冠比

处理	地上生物量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	地下生物量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	根冠比
百慕大	369.44±65.68a	1112.50±155.17a	2.33±1.06b
马尼拉	332.41±36.68a	1237.96±131.95a	3.78±0.79a
高羊茅	324.07±158.66a	136.11±17.35b	0.48±0.18c
玉龙草	220.37±79.37a	158.33±11.79b	1.14±0.42bc

由图 8 可知,植物的根冠比影响过滤带的径流拦截率和表渗流量比,低水力负荷下,植物根冠比与径流拦截率呈极显著负相关,即地上生物量较大的植物其对径流的削减效果较好。当水力负荷升高至中强度,植物根冠比和径流拦截率呈显著负相关;当水力负荷为高强度时,根冠比与径流拦截率没有显著的相关关系。在低、中水力负荷下,根冠比与表渗流量比呈显著负相关关系,即地下生物量越高的植物过滤带的表渗流量比越低,当水力负荷为最高时,二者呈极显著负相关关系。在低、中强度水力负荷下,径流削减率与表渗径流比呈显著或极显著相关,在高水力负荷下二者没有显著相关关系。



注: * 表示不同因子间的相关性显著水平 ($p<0.05$); ** 表示不同因子间的相关性显著水平 ($p<0.01$); *** 表示不同因子间的相关性显著水平 ($p<0.001$); Rate1、Rate2、Rate3 为分别为低、中、高水力负荷下的径流拦截率; Ratio1、Ratio2、Ratio3 分别为低、中、高水力负荷下的表渗流量比; 图中椭圆方向为向右上表示正相关关系,椭圆方向为右下表示负相关关系,正圆越大表示相关系数越大。

3 讨论

在我国南方地区,由短历时或暴雨型的降雨产生的地表径流对地面的冲刷是地面污染物迁移的主要动力^[11]。一般认为,雨强增加可引起径流流失量的升高,但也有研究^[12]认为,在 5°左右的坡度条件下,入流水量的增加对植被过滤带的径流拦截率未产生显著影响。本研究结果表明,植被过滤带相较于裸地可以大幅提高径流拦截率,但随着水力负荷强度的提高,径流拦截率均显著降低。王敏等^[13]研究指出,在河岸带增加植被覆盖可以增加渗流水量,从而提高污染物的总去除率。本研究结果表明,植被通过提高过滤带的表渗流量比来改善对径流和污染物的拦截能力,百慕大和马尼拉 2 种地下生物量较高的植物表渗流量比较低,表明根系发达的植物有助于提高土壤的渗透能力,从而削减地表径流。草本植被的根系使过滤带内部径流速度变慢,泥沙等颗粒物较易沉积,促进土壤系统对磷等污染物的吸附^[14],被过滤带截留的磷下渗到土壤中被植物根系吸收或通过微生物活动等得以去除,即使在较高雨强下植被过滤带依然对污染物有一定的截留作用^[15]。

本研究结果表明,无论在表流或渗流的过程中,植被过滤带对 TP 和 NH_4^+-N 的去除效率均随着水力负荷增加而降低。有研究^[16]表明,当径流量较小时,植被过滤带对径流以及氮、磷等污染物的拦截效率更高。当径流流量较大时,水体经过植被过滤带的时间变短,径流水入渗不充分,因此污染物的截留效率降低^[17]。陈旭飞等^[18]探究了在 3 种降雨强度下香根草植被过滤带对径流和磷的拦截效果,降雨强度提高增加径流的流失量,但与裸地相比仍然显著提高对污染物的拦截率,与本研究结果相似。本研究表明,植被覆盖可以增加渗流水量,从而提高对污染物的拦截能力。通过本试验可知,利用植被渗滤系统将湖岸带进行改造,可以降低污染物随表面径流汇入水体的比例,并提高湖岸带下渗水量,在一定程度上补给地下水。

当入流污染物浓度未超过其所能承受的最大污染负荷范围时,植被过滤带具有显著的拦截作用,目前的研究^[19]表明,输入的氮、磷浓度越高,过滤带的拦截效果越好,但也有一些研究^[20]指出,入流氮、磷浓度的变化对植被过滤带拦截效率的影响并不显著。本试验中随着径流中氮、磷浓度升高,过滤带对渗流中 TN 、 NO_3^--N 和 TP 的去除率均显著升高,与大部分研究结果相符。

不同的植被由于其根系的不同特征,会改善其土

图 8 植物根冠比与径流拦截率和表渗流量比的关系

壤的渗透能力^[21]。有研究^[16]表明,草本植物根系提高土壤渗透水量的能力较强,并且对磷的拦截能力更强;李晓娜等^[22]通过比较 3 种草本植被过滤带对氮、磷的拦截作用得出,草本植被过滤带主要通过植物茎秆的物理作用拦截磷素,通过提高土壤入渗水量拦截氮素。另外,在水力负荷较大时,植物根系处于淹水状态,促进反硝化作用的发生,从而提高硝态氮的去除率^[23],并且增加污染物与土壤中微生物等的反应时间,从而提高土壤去除氮、磷的能力^[24]。Wu 等^[25]通过野外模拟试验得出,百慕大对 TN、TP 的去除效果优于高羊茅和三叶草。本研究中,百慕大和高羊茅过滤带对氮、磷和径流的拦截率较高,特别是在渗流过程中百慕大过滤带的氮素拦截率最高。另外,植物的根冠比影响植被过滤带的径流削减能力,低根冠比的植物拦截更多的径流,但当径流量超过其缓冲极限时,植物的作用逐渐减弱,并且在植物的不同生长期,其根冠比特征发生改变,在进行湖岸带植被过滤带建设时,要注意搭配不同的植被,达到最好的调控效果。

4 结论

(1)4 种植物过滤带均具有较好的径流调控功能,平均径流拦截率为 54.28%~63.16%;其中高羊茅植被过滤带径流拦截率最高($p<0.05$),植被覆盖显著提高土壤对径流的削减能力($p<0.05$),并且根冠比较低的植被削减径流的能力越强。

(2)植被覆盖显著降低土壤渗滤系统的表渗流量比($p<0.05$),通过增加下渗径流量实现对径流的调控,但植被的径流调控作用随着水力负荷提高而减弱。

(3)植被过滤带对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的去除效率随着水力负荷强度的提高而降低, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率下降幅度为 11.43%~24.09%,TP 去除率下降幅度为 18.08%~19.76%。

(4)渗流过程中 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 的去除率随着来水中氮、磷浓度增加而提高,其中,百慕大和高羊茅过滤带对氮、磷的拦截能力较强,优于马尼拉和玉龙草过滤带。

参考文献:

[1] Zhang W Q, Jin X, Liu D, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river: Fuyang River in northern China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 55: 41-48.

[2] Tang Q, Bao Y H, He X B, et al. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the To-

tal Environment, 2014, 479/480: 258-266.

[3] 刘瑞霞,王立阳,孙菲,等.以农业面源污染阻控为目标的河流生态缓冲带研究进展[J].环境工程学报,2022,16(1):25-39.

[4] Flanagan K, Branchu P, Ramier D, et al. Evaluation of the relative roles of a vegetative filter strip and a biofiltration swale in a treatment train for road runoff[J]. Water Science and Technology, 2017, 75(4): 987-997.

[5] Abu-Zreig M, Rudra R P, Whiteley H R, et al. Phosphorus removal in vegetated filter strips[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(2): 613-619.

[6] Genea S M, Hoekstra P F, Hannam C, et al. The role of vegetated buffers in agriculture and their regulation across Canada and the United States[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 243: 12-21.

[7] Prosser R S, Hoekstra P F, Gene S, et al. A review of the effectiveness of vegetated buffers to mitigate pesticide and nutrient transport into surface waters from agricultural areas[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 1-13.

[8] 孙金伟,许文盛.河岸植被缓冲带生态功能及其过滤机理的研究进展[J].长江科学院院报,2017,34(3): 40-44.

[9] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].1 版.北京:中国农业科技出版社,2000:127-135.

[10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000:22-74.

[11] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等.不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J].水土保持通报,2017,37(2): 1-6.

[12] Rose C W, Yu B, Hogarth W L, et al. Sediment deposition from flow at low gradients into a buffer strip: A critical test of re-entrainment theory[J]. Journal of Hydrology, 2003, 280(1): 33-51.

[13] 王敏,黄宇驰,吴建强.植被缓冲带径流渗流水量分配及氮磷污染物去除定量化研究[J].环境科学,2010,31(11): 2607-2612.

[14] 廖敏,叶照金,黄宇,等.长兴县合溪水库集雨区苗木地不同施肥管理模式对径流磷素流失的影响[J].生态学报,2017,37(21): 7342-7350.

[15] Zak D, Bronvang B, Carstensen M V, et al. Nitrogen and phosphorus removal from agricultural runoff in integrated buffer zones[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(11): 6508-6517.

[16] 孙东耀,全川,纪钦阳,等.不同类型植被河岸缓冲带对模拟径流及总磷的消减研究[J].环境科学学报,2018,38(6): 2393-2399.

[17] 余冬立,阿力木·阿布来提,陈倩,等.不同入流条件下植被过滤带对坡面径流氮、磷的拦截效果[J].应用生态学报,2018,29(10): 3425-3432.

科学,2021,49(16):67-73.

[17] 唐杉,王允青,赵决建,等.紫云英还田对双季稻产量及稳定性的影响[J].生态学杂志,2015,34(11):3086-3093.

[18] 张富林,吴茂前,夏颖,等.江汉平原稻田田面水氮磷变化特征研究[J].土壤学报,2019,56(5):1191-1199.

[19] 鲍士旦.土壤农业化学分析方法[M].3 版.北京:中国农业科技出版社,2000.

[20] 郑小龙,吴家森,陈裴裴,等.不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):39-43,48.

[21] 夏小江,胡清宇,朱利群,等.太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J].水土保持学报,2011,25(4):21-25.

[22] 赵冬,颜廷梅,乔俊,等.稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J].生态环境学报,2011,20(4):743-749.

[23] 田昌,周旋,杨俊彦,等.化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响[J].土壤,2020,52(5):311-319.

[24] 周春火,潘晓华,吴建富,等.不同复种方式对早稻产量和氮素吸收利用的影响[J].江西农业大学学报,2013,35(1):13-17.

[25] 丁炳红.紫云英等有机物料还田对稻田氮磷损失及重金属活性的影响[D].杭州:浙江农林大学,2012.

[26] Han W Y, LI Y, Yin H. The influence of mechanical composition and mineral composition of calcareous soil on slope farmland on phosphorus fixation[J].Applied Sciences,2021,11(9):e3731.

[27] 王慧,唐杉,王云青,等.紫云英翻压对稻田土壤肥力和双季稻产量的影响[J].土壤通报,2019,50(6):1385-1389.

[28] 吕玉虎,郭晓彦,李本银,等.翻压不同量紫云英配施减量化肥对土壤肥力和水稻产量的影响[J].中国土壤与肥料,2017(5):94-98.

[29] 张成兰,刘春增,吕玉虎,等.减量化肥配施不同量紫云英对土壤磷素形态及水稻产量的影响[J].中国土壤与肥料,2020(1):101-106.

[30] 王赞,徐昌旭,周国朋,等.连续种植翻压紫云英减施化肥对江西早稻产量、品质及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(10):1735-1745.

[31] 张璐,黄晶,高菊生,等.长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J].农业工程学报,2020,36(5):106-112.

[32] 周宝库,张喜林.长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(2):143-147.

[33] 陈静蕊,秦文婧,王少先,等.化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):281-287.

[34] 张成兰,吕玉虎,刘春增,等.减量化肥配施紫云英对水稻产量稳定性的影响[J].中国土壤与肥料,2021,35(3):704-713.

[35] 张颖睿,杨滨娟,黄国勤.紫云英翻压量与不同施氮量对水稻生长和氮素吸收利用的影响[J].生态学杂志,2018,37(2):430-437.

[36] 程会丹,鲁艳红,聂军,等.化肥减施下紫云英不同翻压量对双季稻产量及养分利用效率的影响[J].华北农学报,2020,35(3):143-152.

[37] 王建红,曹凯,张贤.紫云英还田配施化肥对单季晚稻养分利用和产量的影响[J].土壤学报,2014,51(4):888-896.

(上接第 147 页)

[18] 陈旭飞,刘通,程炯,等.华南地区草被过滤带对菜地径流、泥沙和磷阻控效果及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(2):377-383.

[19] 陈倩,傅瑜,余冬立,等.坡面产流产沙过程对植被过滤带响应的试验研究[J].水土保持学报,2017,31(6):104-109.

[20] 吴建强,黄沈发,黄宇弛,等.污染负荷及植被生物量变化对缓冲带污染物净化效果的影响[J].环境工程学报,2008,2(10):1425-1429.

[21] Fernandez-Ugalde O, Virto I, Bescansa P, et al. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils [J]. Soil and Tillage Research,2009,106(1):29-35.

[22] 李晓娜,张国芳,武美军,等.不同植被过滤带对农田径流泥沙和氮磷拦截效果与途径[J].水土保持学报,2017,31(3):39-44.

[23] 何聪,刘璐嘉,王苏胜,等.不同宽度草皮缓冲带对农田径流氮去除效果研究[J].水土保持研究,2014,21(4):55-58.

[24] Lambrechts T, François S, Lutts S, et al. Impact of plant growth and morphology and of sediment concentration on sediment retention efficiency of vegetative filter strips: Flume experiments and VFSSMOD modeling[J].Journal of Hydrology,2014,511:800-810.

[25] Wu J Q, Xiong L J, Sha C Y. Removal of N, P from seepage and runoff by different vegetated and slope buffer strips[J].Water Science and Technology,2020,82(2):351-363.