

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230239

河岸缓冲带植被配置对径流水中磷的截留效果

黄赛凤^{1,2}, 吴永波^{1,2*}, 茆安敏^{1,2}

(1. 南京林业大学生态与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 研究不同配置缓冲带对径流水中磷素截留效果的影响, 为选择适宜太湖河岸缓冲带和有效治理富营养化提供参考。[方法] 以7块大小为20 m × 40 m的太湖人工林河岸缓冲带为研究对象, 比较不同宽度(15、30、40 m)、不同植被类型('南林95'杨、中山杉林、'南林95'杨-中山杉混交林)、不同林分密度(400、1 000、1 600 株·hm⁻²)的河岸缓冲带对径流水中总磷和可溶性磷的截留效果的差异。[结果] (1) 冬季缓冲带对径流水中总磷和可溶性磷的拦截效果明显优于春季缓冲带; 缓冲带对径流水中可溶性磷的截留率显著高于总磷。(2) 不同的河岸缓冲带对宽度的需求不同。对于中山杉林、混交林、400和1 000 株·hm⁻²的杨树林而言, 15 m宽的河岸缓冲带基本能满足截磷需求; 1 600 株·hm⁻²的杨树林需要40 m以上的河岸缓冲带宽度才能满足对磷的截留要求(3) 对于中山杉林和杨树林缓冲带而言, 林分密度为400 株·hm⁻²的缓冲带对径流水中总磷和可溶性磷的截留效果最好。(4) 中山杉林缓冲带对径流水中磷素的截留效果优于中山杉-杨树混交林和杨树林缓冲带, 中山杉可作为太湖流域河岸缓冲带构建的首选植物。[结论] 15 m宽400 株·hm⁻²的中山杉林缓冲带对径流水中磷素的截留能达到最大效果。

关键词: 河岸缓冲带; 磷; 宽度; 林分密度; 植被类型; 截留率

中图分类号: S718;X522

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)01-0073-09

农业面源污染是水环境污染的主要贡献源, 也是区域水体富营养化的主要原因^[1]。由于农药化肥的不合理使用以及畜禽粪污的混乱排放不仅使耕地质量下降, 而且未被利用的氮磷或残留的农药等污染物还会随径流进入水环境, 引发水体面源污染, 严重威胁居民的饮水安全与健康^[2]。河岸植被缓冲带是防治农业面源污染的主要措施之一, 也是拦截污染物进入湖泊与河流的最后一道绿色屏障。缓冲带经过水-土壤-植被的过滤、渗透、吸收、滞留、沉降等物理、化学作用及生物效能, 可有效阻控氮磷等污染物进入周边水系, 对富营养化水体的修复具有重要作用^[3-4]。研究发现采取“放宽控N、集中控P的策略”治理湖泊富营养化可大幅度降低治理

成本及提高治理效率^[5]。

近年来, 河岸植被缓冲带的研究侧重于缓冲带的构建技术^[6], 但当前缓冲带的设计通常不够具体, 也缺乏对缓冲带可持续性和长期效率的考虑^[7]。对缓冲带宽度的需求往往因主要功能、截污效率的不同而存在较大的差异, 并没有统一的标准。Cao等^[8]研究发现缓冲带截污率达50%时, 总氮需要的宽度远大于总磷。孙东耀等^[9]研究表明, 缓冲带对径流总磷的削减主要集中在前10 m, 截留率可达80%以上。草本、灌木和乔木具有不同的截污能力, 植被类型的不同会导致缓冲带对污染物的阻控效率产生差异^[10]。植被密度是影响缓冲带截留效率的另一重要因素, 目前针对适宜植被密

收稿日期: 2023-06-06 修回日期: 2023-11-09

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目“截留氮磷适宜河岸植被缓冲带结构与效应评价技术推广与示范”(苏[2022]TG03); 国家林业局引进国际先进林业科学技术计划项目“富营养化湿地滨岸植被缓冲带构建技术引进”(2013-4-63)

* 通讯作者: 吴永波, 博士, 副教授。主要研究方向: 富营养化湖泊湿地生态修复。E-mail: yongbowu0920@163.com

度缓冲带对污染物截留效率的研究并不多见。Abu-Zreig 等^[11]研究指出总磷截留率与草本盖度呈线性增加关系。Lv 和 Wu^[12]研究发现 1 000 株·hm⁻² 的森林缓冲带对氮素的削减效率显著高于 1 600 株·hm⁻²。由此可见,在构建缓冲带的过程中,不同的缓冲带配置对截污效果有着重要影响,这也是缓冲带对污染物的阻截效率有显著差异的主要原因。

太湖流域农业发达,化肥施用量普遍偏高,加上肥料效率不足 40%,土壤中盈余的氮、磷极易发生流失,引发农业面源污染^[13-14]。太湖水环境富营养化问题突出,氮、磷指标是造成太湖水体富营养化的关键因子^[15]。目前太湖总氮浓度得到较好的控制,总磷浓度仍长期处于高位波动状态^[16],磷素成为制约太湖水环境质量根本性好转的关键因素。因此,本文以太湖流域河岸人工林缓冲带为研究对象,对比研究不同配置缓冲带对径流水中总磷和可溶性磷的截留效率的差异,旨在提出最优的太湖流域缓冲带植被配置模式,为太湖农业面源污染的治理提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省宜兴市周铁镇沙塘岗村东部(31°07′~31°37′ N, 119°31′~120°03′ E),太湖西部沿岸,与太湖一堤之隔。研究区属亚热带季

风气候,全年温暖湿润雨水充沛,四季分明。年均降雨时间 136.6 d,年均降水量 1 177 mm,春夏季雨水较集中,年平均气温 15.7 °C,年均日照时数为 1 924.2 h。地表和地下水丰富。研究区土壤类型为中性黄壤,土质均匀,土壤密度为 1.38 g·cm⁻³。周边居民主要以农业为主,主要种植水稻(*Oryza sativa* L.),小麦(*Triticum aestivum* L.)和油菜(*Brassica napus* L.)等农作物。林下为自然更新的草本植物,以芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud)为主。

1.2 样地设置

试验共设置 7 个大小为 20 m × 40 m 的小区,自西向东面临太湖垂直于地表径流方向,坡度比为 1:250(图 1)。各小区之间边缘均用厚 2 mm、高 60 cm 的 PVC 板隔开(地下 40 cm,地上 20 cm)。样地乔木配置见表 1。中山杉(*Taxodium* 'Zhongshanshan')和'南林 95'杨(*Populus* × *euramericana* 'Nanlin 95')生长状况良好,林龄均为 6 a,平均树高分别为 4.6 m 和 8.9 m,胸径分别为 5.2 cm 和 8.8 cm。各小区设置 4 个河岸植被缓冲带宽度(0、15、30 和 40 m),在不同宽度处分别埋设 3 组 PVC 淋溶管,采集 20 cm 和 40 cm 深度的径流水(图 2)。

1.3 样品采集与处理

于 3 月和 12 月各人工施肥一次,降雨前在各

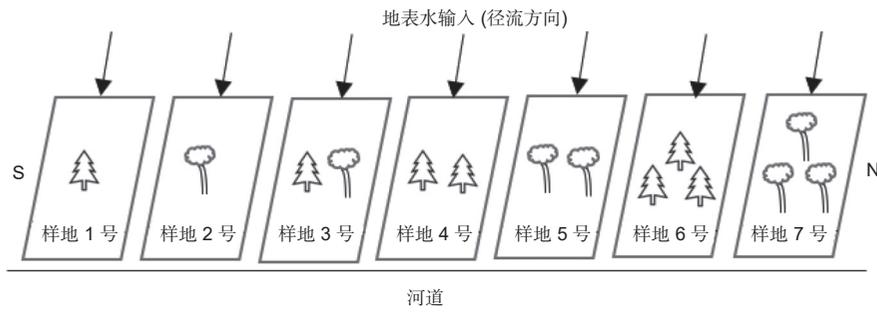


图 1 采样地设置示意图

Fig. 1 Sketch map of setting sampling sites

表 1 样地植物配置

Table 1 Allocation of vegetation in the experiment plots

样地设置	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号
植物配置	中山杉林	杨树林	杨树-中山杉混交林	中山杉林	杨树林	中山杉林	杨树林
密度/(株·hm ⁻²)	400	400	1 000	1 000	1 000	1 600	1 600

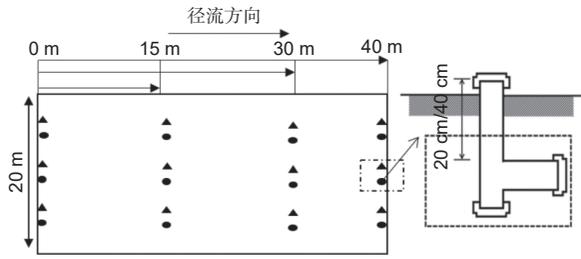


图 2 试验样地小区淋溶管铺设示意图

Fig. 2 Leaching pipe laying schematic setting in each experimental plot

样地起始端 0~0.5 m 处进行, 施肥量参考当地农田施肥量 ($1\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 复合肥氮磷钾比例为 16 : 8 : 16。施肥一周后采集水样, 共采集水样 336 个。用小型水泵抽取不同宽度处 20 和 40 cm 深淋溶管内径流水样, 装入 100 mL 塑料瓶中, 带回实验室后放入 4 °C 冰箱保存并尽快测定。采样期间前 1 周平均降雨量分别为 81.5 和 52.4 mm。采用钼锑抗-紫外分光光度法测定水样中总磷和可溶性磷。其中待测可溶性磷的水样先经过 0.45 μm 滤膜抽滤预处理。

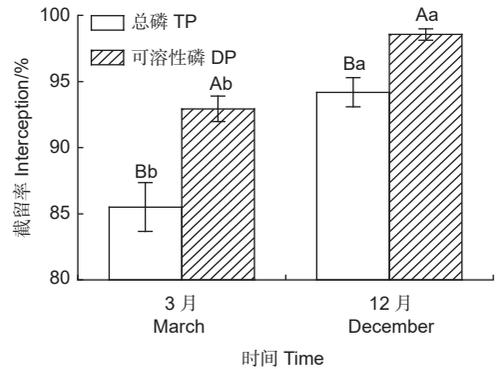
1.4 数据处理与分析

径流水磷素截留效率 $R_i = (C_0 - C_i) / C_0 \times 100\%$, 其中, R_i 为缓冲带不同宽度处径流水中磷素截留率; C_0 为缓冲带起始处径流水中磷素含量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); C_i 为缓冲带不同宽度采样点处径流水中磷素含量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); i 为缓冲带不同宽度处理 ($i = 15, 30$ 和 40, 单位 m)。采用 SPSS 和 Origin 进行数据分析并作图。

2 结果与分析

2.1 径流水中磷素截留的季节性变化

图 3 是径流水中总磷和可溶性磷的截留率随时间变化的动态特征。由图 3 知, 缓冲带对径流水中磷素的截留效果具有明显的季节变化, 径流水中总磷和可溶性磷的截留率均在 12 月份达到峰值, 分别达 92.12% 和 98.55%, 3 月份缓冲带对总磷和可溶性磷的截留效果较差。12 月径流水中总磷和可溶性磷的截留率均显著高于 3 月 ($P < 0.05$)。缓冲带对径流水中总磷和可溶性磷的截留效果出现较大差异, 春季和冬季缓冲带对径流水中可溶性磷的截留效率均显著高于总磷 ($P < 0.05$)。



注: 不同大写字母表示同月份不同类型磷间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一类型磷不同月份间差异显著 ($P < 0.05$)

Notes: Different uppercase letters indicate significant differences between different types of phosphorus in the same month ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences between different months for the same type of phosphorus ($P < 0.05$)

图 3 不同时间太湖流域河岸缓冲带对磷素的截留效果

Fig. 3 Removal rates of TP and DP of different months by riparian buffer strips of Taihu Lake

2.2 杨树林缓冲带对径流水磷素的截留效果

2.2.1 不同宽度杨树林缓冲带对磷截留的差异

如表 2 所示, 在各林分密度下, 前 15 m 径流水中总磷和可溶性磷含量下降趋势明显, 15 m 后下降趋势减缓。400 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下, 总磷的 R_{15} 处达 89.96%, R_{30} 有所下降但差异不显著; 可溶性磷的 R_{30} 和 R_{40} 显著高于 R_{15} ($P < 0.05$)。密度为 1 000 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 情况下, 随着宽度的增加, 总磷和可溶性磷的 R_i 呈先下降后上升趋势; 总磷 R_{15} 与其他 R_i 无显著差异, R_{30} 显著低于 R_{40} ($P < 0.05$); 可溶性 R_{15} 显著高于 R_{30} 和 R_{40} ($P < 0.05$)。1 600 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下, 随着宽度的增加, 缓冲带对总磷和可溶性磷的截留率呈上升趋势; 总磷 R_i 随宽度的变化差异显著 ($P < 0.05$), 总磷 R_{15} 仅为 56.63%, R_{40} 最高, 可达 76.85%; 可溶性磷 R_{15} 显著低于 R_{30} 和 R_{40} ($P < 0.05$)。

2.2.2 不同密度杨树林缓冲带对磷截留的差异

由表 2 知, 15~40 m 宽度区间内随着密度的增加总磷 C_i 呈上升趋势, 总磷 R_i 呈下降趋势。总磷 C_{15} 和 R_{15} 在不同密度间均差异显著 ($P < 0.05$)。杨树林总磷 C_{30} 和 C_{40} 在 400 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 下显著低于其他密度下 ($P < 0.05$), 可溶性磷 C_{30} 和 C_{40} 在 1 000 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 下显著高于其他密度下 ($P < 0.05$); 总磷 R_{30} 和 R_{40} 随密度的增加而降低且存在显著性差异 ($P < 0.05$); 溶性磷 R_{30} 和 R_{40} 在 400 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 缓冲带下最高, 与 1 600 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 缓冲带无显著差

表 2 杨树林缓冲带径流水中磷的截留效果

Table 2 Removal rates of TP and DP by poplar plantation buffer strips

项目 Item	宽度 Width/m	含量 $C_i/(mg \cdot L^{-1})$			平均截留率 $R_i/\%$		
		400 株·hm ⁻²	1 000 株·hm ⁻²	1 600 株·hm ⁻²	400 株·hm ⁻²	1 000 株·hm ⁻²	1 600 株·hm ⁻²
总磷 TP	0	2.533 ± 0.327Aa	3.626 ± 0.330Aa	2.822 ± 0.019Aa			
	15	0.252 ± 0.019Cb	0.684 ± 0.022Bb	1.224 ± 0.068Ab	89.96 ± 2.07Aa	81.05 ± 1.11Bab	56.63 ± 2.11Cb
	30	0.321 ± 0.040Bb	0.771 ± 0.085Ab	0.730 ± 0.019Ab	86.90 ± 0.04Aa	78.77 ± 0.42Bb	74.12 ± 0.50Ca
	40	0.211 ± 0.055Bb	0.630 ± 0.045Ab	0.654 ± 0.091Ab	91.82 ± 1.10Aa	82.59 ± 0.35Ba	76.85 ± 3.07Ba
可溶性磷 DP	0	1.542 ± 0.210Aa	2.356 ± 0.257Aa	1.808 ± 0.173Aa			
	15	0.054 ± 0.016Ab	0.047 ± 0.001Ab	0.066 ± 0.008Ab	96.57 ± 0.54Ab	97.96 ± 0.26Aa	96.37 ± 0.09Ab
	30	0.019 ± 0.002Bb	0.358 ± 0.026Ab	0.023 ± 0.001Bb	98.75 ± 0.33Aa	84.76 ± 0.57Bb	98.73 ± 0.10Aa
	40	0.009 ± 0.003Bb	0.315 ± 0.042Ab	0.016 ± 0.001Bb	99.39 ± 0.26Aa	86.25 ± 3.28Bb	99.09 ± 0.05Aa

注：不同大写字母表示同一宽度不同密度之间有显著性差异($P<0.05$)，不同小写字母表示同一密度不同宽度之间有显著性差异($P<0.05$)。下同
Notes: Different uppercase letters indicate significant difference between different densities of the same width ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant difference between different widths of the same density ($P<0.05$). The same below

异，二者显著高于 1 000 株·hm⁻² 缓冲带 ($P<0.05$)。总体来看，杨树林对总磷和可溶性磷的截留效果分别表现为 400 株·hm⁻² 下好于 1 000 株·hm⁻² 下好于 1 600 株·hm⁻² 下和 400 株·hm⁻² 下好于 1 600 株·hm⁻² 下好于 1 000 株·hm⁻² 下。400 株·hm⁻² 的杨树林缓冲带对磷素具有较好的拦截效果。

2.3 中山杉林缓冲带对径流水磷素的截留效果

2.3.1 不同宽度中山杉林缓冲带对磷截留的差异

根据表 3 可以看出，同一密度下，径流水经过 15 m 宽的缓冲带后，径流水中总磷和可溶性磷含

量大幅度降低，宽度大于 15 m 后径流水中磷素含量无显著差异。总体上，随着宽度的增加，总磷和可溶性磷截留率总体呈先上升后下降的趋势。林分密度为 400 和 1 000 株·hm⁻² 时，总磷和可溶性磷截留率随宽度的变化均无显著差异 ($P>0.05$)。林分密度为 1 600 株·hm⁻² 时，不同宽度缓冲带之间对总磷的截留率差异不显著，各宽度下总磷截留率表现为： $R_{15}>R_{40}>R_{30}$ ；可溶性磷的 R_{15} 和 R_{30} 显著高于 R_{40} ($P<0.05$)。

表 3 中山杉林缓冲带径流水中磷的截留效果

Table 3 Removal rates of TP and DP by *Taxodium* 'Zhongshanshan' plantation buffer strips

项目 Item	宽度 Width/m	含量 $C_i/(mg \cdot L^{-1})$			平均截留率 $R_i/\%$		
		400 株·hm ⁻²	1 000 株·hm ⁻²	1 600 株·hm ⁻²	400 株·hm ⁻²	1 000 株·hm ⁻²	1 600 株·hm ⁻²
总磷 TP	0	4.338 ± 0.175Aa	4.958 ± 0.238Aa	4.287 ± 0.524Aa			
	15	0.089 ± 0.011Cb	0.186 ± 0.018Bb	0.280 ± 0.026Ab	97.94 ± 0.34Aa	96.23 ± 0.54ABa	93.30 ± 1.42Ba
	30	0.057 ± 0.009Cb	0.124 ± 0.012Bb	0.427 ± 0.001Ab	98.67 ± 0.26Aa	97.47 ± 0.36Aa	89.90 ± 1.26Ba
	40	0.074 ± 0.007Bb	0.162 ± 0.001Bb	0.415 ± 0.034Ab	98.29 ± 0.10Aa	96.73 ± 0.14Aa	90.28 ± 2.01Ba
可溶性磷 DP	0	3.323 ± 0.111Ba	4.550 ± 0.000Aa	2.996 ± 0.276Ba			
	15	0.026 ± 0.010Ab	0.042 ± 0.019Ab	0.022 ± 0.007Ab	99.21 ± 0.32Aa	99.08 ± 0.42Aa	99.29 ± 0.17Aa
	30	0.022 ± 0.004Ab	0.028 ± 0.013Ab	0.014 ± 0.002Ab	99.33 ± 0.13Aa	99.38 ± 0.28Aa	99.53 ± 0.11Aa
	40	0.044 ± 0.003Bb	0.080 ± 0.004Bb	0.171 ± 0.030Ab	98.66 ± 0.12Aa	98.25 ± 0.08ABa	94.14 ± 1.63Bb

2.3.2 不同密度中山杉林缓冲带对磷截留的差异

由表 3 知，15~40 m 宽度区间内中山杉林总磷和可溶性磷的 C_i 随着密度的增加呈上升趋势，中

山杉林总磷和可溶性磷的 R_i 随着密度的增加呈下降趋势。中山杉林总磷 C_{15} 在不同密度间差异显著 ($P<0.05$)，总磷 R_{15} 在 400 株·hm⁻² 下显著大

于 $1\ 600\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下 ($P<0.05$)。总磷 C_{30} 在各密度下差异显著 ($P<0.05$)，总磷 R_{30} 在 400 和 $1\ 000\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下显著高于 $1\ 600\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下。总磷和可溶性磷 C_{40} 在 $1\ 600\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下显著大于其他密度下 ($P<0.05$)；总磷的 R_{40} 变化规律与 R_{30} 大致相同；可溶性磷 R_{40} 在 $400\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 缓冲带显著高于在 $1\ 600\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 缓冲带 ($P<0.05$)。总体上，随着林分密度的下降，中山杉林缓冲带对总磷和可溶性磷的截留率增大。 $400\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的中山杉林缓冲带对总磷和可溶性磷的阻控效果最好。

表 4 杨树-中山杉混交林缓冲带径流水中磷的截留效果

Table 4 Removal rates of TP and DP by 'Nanlin 95' - 'Zhongshanshan' mixed plantation buffer strips

宽度 Width/m	总磷含量 TP C_i /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总磷平均截留率 TP R_i /%	可溶性磷含量 DP C_i /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	可溶性磷平均截留率 DP R_i /%
0	$4.039 \pm 0.741\text{a}$		$2.772 \pm 0.210\text{a}$	
15	$0.224 \pm 0.023\text{b}$	$94.16 \pm 1.64\text{a}$	$0.031 \pm 0.003\text{b}$	$98.88 \pm 0.21\text{a}$
30	$0.183 \pm 0.015\text{b}$	$95.23 \pm 1.26\text{a}$	$0.092 \pm 0.007\text{b}$	$96.63 \pm 0.52\text{b}$
40	$0.189 \pm 0.035\text{b}$	$95.00 \pm 1.78\text{a}$	$0.073 \pm 0.005\text{b}$	$97.32 \pm 0.39\text{ab}$

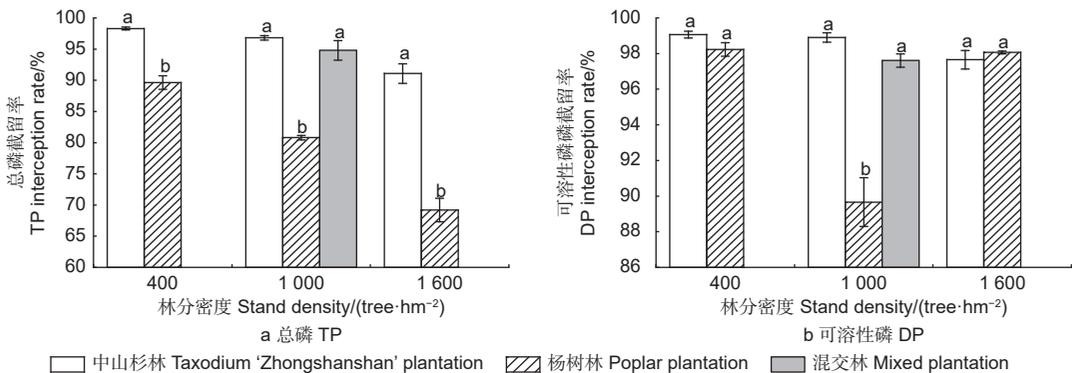
2.5 不同植被类型缓冲带对径流水中磷素的截留效果

各林分密度下，乔木林（中山杉林、杨树林和混交林）缓冲带对径流水中总磷和可溶性磷的截留效果不同。由图 4 (a) 知，当密度为 400 和 $1\ 600\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，中山杉林对总磷的 R_i 最高且与杨树林差异显著 ($P<0.05$)。密度为 $1\ 000\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 情况下，中山杉林和混交林对总磷的 R_i 显著高于杨树林 ($P<0.05$)，中山杉林与混交林间总磷的截留效果无显著差异 ($P>0.05$)，各植被类型缓冲带

2.4 混交林缓冲带对径流水磷素的截留效果

林分密度 $1\ 000\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的杨树-中山杉混交林对径流水中磷的截留率见表 4。总磷和可溶性磷的 C_{15} 较对照大幅度下降，分别减少了 94.16% 和 98.88% 。混交林总磷和可溶性磷的 C_{15} 、 C_{30} 和 C_{40} 差异均不显著 ($P>0.05$)。总磷的 R_{40} 较 R_{30} 略有下降。可溶性磷的 R_{15} 显著高于 R_{30} ($P<0.05$)。各宽度下总磷和可溶性截留率由高到低分别表现为 $R_{30}>R_{40}>R_{15}$ 和 $R_{15}>R_{40}>R_{30}$ 。

对总磷的 R_i 表现为中山杉林>混交林>杨树林。图 4 (b) 中，密度为 $400\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下，中山杉林对可溶性磷的 R_i 大于杨树林，但差异不显著。 $1\ 000\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 密度下，不同类型植被缓冲带对可溶性磷的 R_i 与总磷的 R_i 变化规律相似，中山杉林和混交林对可溶性磷的 R_i 显著高于杨树林 ($P<0.05$)，3 种缓冲带对可溶性磷的 R_i 效率大小依次为：中山杉林>混交林>杨树林。 $1\ 600\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下，杨树林对可溶性磷的 R_i 略高于中山杉林。综合可知，密度为 $1\ 000\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 情况



注：不同小写字母表示同密度不同植被类型间差异显著 ($P<0.05$)

Notes: Different lowercase letters indicate significant difference between different vegetation types with the same density ($P<0.05$)

图 4 不同植被类型缓冲带对径流水中总磷截留效果

Fig. 4 Removal rates TP and DP by riparian buffer strips with different plantations

下,混交林缓冲带对磷素的截留效率强于杨树林缓冲带,中山杉林缓冲带能有效降低径流水中的磷素,效果优于杨树林和混交林缓冲带。

3 讨论

本研究结果表明冬季缓冲带对总磷和可溶性磷的截留率(R_t)显著高于春季。在非生长季,缓冲带对磷素的截留效率较高,推其原因,一方面可能是因为冬季太湖流域土壤微生物生物量磷和磷酸酶活性高于其他季节^[17],秋季积累的凋落物为冬季微生物的代谢提供丰富的底物以促进土壤微生物固定活化磷素;另一方面可能是由于春季是施肥高峰期以及雨水多,缓冲带污染物运输负荷增多,导致截污效率下降^[18]。本论文研究对象中山杉和杨树均处在幼龄阶段,植物生长发育前期对磷素的吸收较快,但随着林龄的增加,缓冲带对污染物的去除效果将发生变化甚至出现饱和状态。此外,缓冲带仅能将截留吸附的磷素暂时储存在缓冲带中,为了最大程度保持缓冲带的可持续性,普遍的做法是对地上草本进行定期收割^[19]。周子尧等^[20]研究发现太湖流域春季乔木林缓冲带对磷素的截留效果较夏季差。结合本研究春季缓冲带对磷素的截留率低于冬季的结果,可选择在截磷效率较低的植被生长季节—春季对研究区的林下草本进行收割。

缓冲带对径流水中不同形态磷的削减能力不同。径流水中磷素主要以颗粒态和溶解态两种形态存在^[21]。颗粒态磷主要是通过植被的拦截和过滤作用吸附沉积在缓冲带中,入渗和土壤吸附是可溶性磷主要的去除机制,可溶态磷随径流入渗土壤后可被植物根系和微生物同化吸收^[22-23]。本研究发现缓冲带对径流水中可溶性磷的截留效果较总磷好,可溶性磷的截留效率显著高于总磷,此结论与其他学者的研究结果一致^[24-25]。缓冲带对总磷和可溶性磷的截留效果出现差异,这可能与样地坡度小有关,平缓的坡度可增加径流滞留的时间和降低径流速度^[26],提高土壤水力渗透的能力,可溶态磷能充分入渗到土壤中。此外,也可能是受到样地林下植被状况的影响,缓冲带对颗粒态磷的阻截能力有限。

一般认为,缓冲带越宽对污染物的阻截效果越好^[27]。但影响污染物截留效率的因素有很多,当宽度足够宽时,这种趋势才明显^[28]。本研究结果表明,持续增加缓冲带的宽度并不能显著提升磷素截

留率,甚至会出现截留率下降的结果,这与史中奇等^[29]的研究结果相符。这可能是由于地表植被对磷的固持能力相对较弱,被缓冲带阻截下的磷素可随着径流的冲刷再次进入缓冲带中;且前段缓冲带阻截了绝大部分径流水中的磷素,致使径流中磷素含量大幅度削减,当径流流经缓冲带时,土壤中磷可以通过淋溶和解吸进入径流中,这也可能导致磷素含量大多不降反升^[30]。缓冲带过宽会造成土地资源浪费和管护成本提高,实际应用中需考虑缓冲带截留效率与建设成本的最佳结合点,合理构建缓冲带的宽度是有效控制农业面源污染的重点。参考朱颖等^[31]的研究,将径流中磷素去除率达80%时的宽度定为缓冲带的最佳宽度。本研究发现,缓冲带径流水中磷素含量在15 m处明显下降,3种密度的中山杉林、1 000株·hm⁻²的混交林、400和1 000株·hm⁻²的杨树林缓冲带在15 m处总磷和可溶性磷截留率均达80%以上。这说明缓冲带对磷素的截留集中在前段的15 m,15 m宽的河岸缓冲带能有效去除径流水中磷素。国内学者在研究植被缓冲带对面源污染影响时同样发现,缓冲带对径流污染物的截留能力在前段15 m较强^[32-33]。对于密度1 600株·hm⁻²的杨树林缓冲带而言,随着缓冲带宽度的增加,总磷截留率显著增长,但其在40 m处总磷截留率仍不足80%,这表明1 600株·hm⁻²杨树林缓冲带对宽度的要求更高,至少需要40 m以上的宽度才能满足对磷的截留要求。可见,植被密度与缓冲带宽度的确定有密切关系。Yang等^[34]也认为植被密度是确定缓冲带最佳去除效率和最佳宽度的关键因素。

在建造缓冲带的过程中相较于改变缓冲带的坡度、宽度以优化缓冲带的格局,合理调整林分密度的措施的可操作性和经济性也很强。植被的疏密程度影响缓冲带中磷的传输效率,适宜的林分密度会促进缓冲带对磷素的截留^[35]。本研究结果表明,对于杨树林和中山杉林而言,林分密度为400株·hm⁻²的缓冲带对磷素的截留效果最佳,高密度缓冲带对磷素的拦截效果较差,这可能是因为密集生长的草本植被在延缓径流和降解、吸收和沉积磷素方面发挥着重要作用^[36],随着林分密度的增加,林下草本覆盖度会减少^[37],导致林下植被对磷素的拦截效率被削弱。有研究认为,草本截污效果显著且地面覆盖率远高于林木,在建立森林缓冲带时,

林分密度应保持在足够低的水平, 以促进草本的生长^[38], 本研究结果支持这一观点。郭蔚华等^[39]的研究也表明在乔灌草植被配置中, 乔木覆盖率越高, 其对磷污染物的去除效果越差, 乔木覆盖率小于 40% 时, 磷素削减效果较好, 且乔木落叶易增加径流水中的磷含量。有研究发现, 林分密度对缓冲带阻截效果的影响主要是由于冠层截留^[40]。林分密度对林木冠幅和树高的生长有显著影响^[41], 中山杉和杨树都属于喜光速生树种, 对光照、水肥、空间需求更高, 适当稀植不仅可以促进林木的自身生长, 还能增加林下透光度, 促使部分喜光先锋灌木和草本植物的入侵, 增强的林分的自我更新能力和生态稳定性。

植被对养分的吸收主要取决于植被类型, 总生物量高的植被对养分的吸收能力更强^[42]。植被根系越发达、生物量越高, 越能促进植物根系吸收污染物。本研究发现, 中山杉林对径流水中总磷和可溶性磷的拦截效果最好, 杨树-中山杉混交林和杨树林对磷素的拦截能力相对较弱。张钰荣等^[43]的研究结果也证实中山杉林缓冲带对径流水中磷素的截留率高于杨树林。中山杉较杨树而言是深根系树种, 其较深的根系不仅能改变土壤结构以此影响土壤入渗率^[44], 还能增强土壤抗冲刷能力。进一步分析发现 1 000 株·hm⁻² 的混交林对磷素的截留效果较 400 和 1 000 株·hm⁻² 的中山杉林差, 可能是因为 1 000 株·hm⁻² 的林分密度对于混交林而言不适宜, 不合理的林分密度会影响种间化感物质的释放^[45], 进而影响林内群落结构, 降低了缓冲带对污染物的截留效果。下一步应增设对林分密度为 400 和 1 600 株·hm⁻² 的杨树-中山杉混交林缓冲带径流水中磷素的截留效率的研究。传统施化肥可增加土壤 pH 值和盐分含量^[46], 中山杉作为盐碱地治理的优良乔木, 对当地较高强度施肥的环境有更强的适应能力。因此认为中山杉是太湖流域富营养化水体修复的首选植物, 可将中山杉林植被缓冲带在太湖地区推广应用。

中山杉和杨树均属当地优势树种, 可作为适宜的太湖流域缓冲林带树种。在构建乔木缓冲带过程中, 合理的缓冲带植物配置应利用灌草植被覆盖率高、生长周期短和成本低的优势, 同时结合乔木生物量大、根系深和长期截污能力强的特点, 充分提高缓冲带对污染物的截留效果以及保持缓冲带的长

期有效性。本研究选择了影响缓冲带截留磷素效率主要的 3 种因素: 宽度、植被类型、密度, 但土壤性质、地形、其他污染物类型、水位特征及径流强度等因素亦会影响缓冲带的截留效率^[47], 这可能导致各研究区域的缓冲带配置的截留效果不同。本研究结果可给同为坡度较平缓地区的缓冲带优化设计提供一定的参考, 其他区域具体的植被缓冲带配置还需要根据实地的情况选择。

4 结论

本研究探讨不同乔木林缓冲带配置对径流水中总磷和可溶性磷的截留效果的影响。结果表明冬季缓冲带对径流水中磷素的截留效果优于春季缓冲带。15 m 宽的河岸缓冲带基本能满足截留磷素的需求, 1 600 株·hm⁻² 的杨树林缓冲带需要 40 m 以上的宽度才能满足对磷的截留要求。400 株·hm⁻² 的林分密度是构建河岸缓冲带的最佳密度。中山杉林缓冲带对磷素的截留效果较混交林和杨树林缓冲带好。综合得出, 15 m 宽 400 株·hm⁻² 的中山杉林河岸缓冲带能有效拦截磷素。

参考文献:

- [1] 王一格, 王海燕, 郑永林, 等. 农业面源污染研究方法与控制技术研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 25-33.
- [2] 王 萌, 杨生光, 耿润哲. 农业面源污染防治的监测问题分析[J]. 中国环境监测, 2022, 38(2): 61-66.
- [3] RAHMANA A, RAHMANA S, CIHACEK L. Influence of soil pH in vegetative filter strips for reducing soluble nutrient transport[J]. Environmental Technology, 2014, 35(14): 1744-1752.
- [4] DOSSKEY M G, VIDON P, GURWICK N P, *et al.* The role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in streams[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 46(2): 261-277.
- [5] 王洪铸, 王海军, 李 艳, 等. 湖泊富营养化治理: 集中控磷, 或氮磷皆控[J]. 水生生物学报, 2020, 44(5): 938-960.
- [6] 胡海波, 邓文斌, 王 震. 长江流域河岸植被缓冲带生态功能及构建技术研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 214-222.
- [7] RAMLER D, STUTTER M, WEIGELHOFER G, *et al.* Keeping up with phosphorus dynamics: overdue conceptual changes in vegetative filter strip research and management[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 764333.
- [8] CAO X Y, SONG C L, XIAO J, *et al.* The optimal width and mechanism of riparian buffers for storm water nutrient removal

- in the Chinese eutrophic Lake Chaohu Watershed[J]. *Water*, 2018, 10(10): 1489.
- [9] 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.
- [10] AGUIAR T R, RASERA K, PARRON L M, *et al.* Nutrient removal effectiveness by riparian buffer zones in rural temperate watersheds: the impact of no-till crops practices[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 149: 74-80.
- [11] ABU-ZREIG M, RUDRA R P, WHITELEY H R. Phosphorus removal in vegetated filter strips[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(2): 613-619.
- [12] LV J, WU Y B. Nitrogen removal by different riparian vegetation buffer strips with different stand densities and widths[J]. *Water Supply*, 2021, 21(7): 3541-3556.
- [13] 汪玉, 赵旭, 王磊, 等. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 829-835.
- [14] 汪玉, 袁佳慧, 陈浩, 等. 太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测[J]. *土壤学报*, 2022, 59(6): 1640-1649.
- [15] 胡晓燕, 朱元荣, 孙福红, 等. 河流氮磷和水量输入对太湖富营养化的影响机理研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(6): 1407-1418.
- [16] 吴浩云, 贾更华, 徐彬, 等. 1980年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(4): 974-991.
- [17] 王亚茹. 不同杨树人工林类型下土壤磷淋失特征的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
- [18] 李想, 邸青. 暴雨和缓冲带特征对城市滨水缓冲带雨洪消减与水质净化效果的影响机制[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5932-5942.
- [19] KELLY J M, KOVAR J L, SOKOLOWSKY R, *et al.* Phosphorus uptake during four years by different vegetative cover types in a riparian buffer[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 78(3): 239-251.
- [20] 周子尧, 吴永波, 余昱莹, 等. 河岸杨树人工林缓冲带对径流水中磷素截留效果的研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(2): 100-106.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 吴永波. 河岸植被缓冲带减缓农业面源污染研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(3): 143-148.
- [24] 魏忠平, 朱永乐, 汤家喜, 等. 模拟黑麦草植被缓冲带对径流中氮、磷以及悬浮颗粒物的截留效果研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(3): 328-334.
- [25] 查晶晶, 吴永波, 茆安敏, 等. 河岸人工林缓冲带对径流水磷素的截留效果[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(4): 639-645.
- [26] 吴建强. 不同坡度缓冲带滞缓径流及污染物去除定量化[J]. *水科学进展*, 2011, 22(1): 112-117.
- [27] 程昌锦, 张建, 宋涵晴, 等. 丹江口库区马尾松人工林地表径流氮磷截留效应[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1567-1573.
- [28] MAYER P M, REYNOLDS S K, MCCUTCHEM M D, *et al.* Meta-analysis of nitrogen removal in riparian buffers[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(4): 1172-1180.
- [29] 史中奇, 王猛, 谭军, 等. 植被缓冲带对乌梁素海区域农业面源污染的削减效果[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 51-56.
- [30] 李怀恩, 邓娜, 杨寅群, 等. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 81-86.
- [31] 朱颖, 吴永波, 李文霞, 等. 河岸人工林缓冲带截留磷素能力及适宜宽度[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(12): 31-36+41.
- [32] 赵警卫, 胡彬. 河岸带植被对非点源氮、磷以及悬浮颗粒物的截留效应[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(4): 51-55.
- [33] 朱晓成, 吴永波, 余昱莹, 等. 太湖乔木林河岸植被缓冲带截留氮素效率[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(3): 565-572.
- [34] YANG F S, YANG Y Q, LI H E, *et al.* Removal efficiencies of vegetation-specific filter strips on nonpoint source pollutants[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 145-158.
- [35] BU X, XUE J, ZHAO C, *et al.* Sediment and nutrient removal by integrated tree-grass riparian buffers in Taihu Lake watershed, eastern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 71(2): 129-136.
- [36] HU Y X, GAO L, MA C M, *et al.* The comprehensive reduction capacity of five riparian vegetation buffer strips for primary pollutants in surface runoff[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(6): 3898.
- [37] 周树平, 梁坤南, 杜健, 等. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究[J]. *植物研究*, 2017, 37(2): 200-210.
- [38] COLE L J, STOCKAN J, HELLIWELL R. Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services: a review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 296: 106891.
- [39] 郭蔚华, 徐灵华, 王柱. 桃花溪河岸生态建设中植物配置与面源氮磷削减[J]. *科技导报*, 2010, 28(7): 50-54.
- [40] 卜晓莉, 王利民, 薛建辉. 湖滨林草复合缓冲带对泥沙和氮磷的拦截效果[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 32-36.
- [41] WANG L M, DUGGIN J A, NIE D. Nitrate-nitrogen reduction by established tree and pasture buffer strips associated with a cattle feedlot effluent disposal area near Armidale, NSW Australia[J]. *Journal Environmental Management*, 2012, 99: 1-9.
- [42] SYVERSEN N. Effect and design of buffer zones in the Nordic climate: the influence of width, amount of surface runoff, seasonal variation and vegetation type on retention efficiency for nutrient and particle runoff[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(5): 483-490.
- [43] 张钰荣, 吴永波, 茆安敏. 两种河岸缓冲带对径流水中磷的截留效果[J]. *森林与环境学报*, 2023, 43(2): 139-144.
- [44] CAI Y M, FENG M Q, ZHANG T. Review of distribution of nitro-

gen and phosphorus in riparian zones of Chinese inland water bodies[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 583-592.

[45] 李金金, 张健, 张阿娟, 等. 不同密度巨桉人工林林下植物多样性及根际土壤化感物质[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2175-2184.

[46] 肖占文, 鄂利锋, 任建忠, 等. 化肥减量配施有机硅有机肥对盐碱

土改良及玉米产量的影响[J]. *耕作与栽培*, 2022, 42(3): 42-45.

[47] LI R, KUO Y M. Effects of shallow water table depth on vegetative filter strips retarding transport of nonpoint source pollution in controlled flume experiments[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2021, 15(1): 163-175.

Effect of Vegetation Configuration in Riparian Buffer Strip on Phosphorus Retention in Runoff Water

HUANG Sai-feng^{1,2}, WU Yong-bo^{1,2}, MAO An-min^{1,2}

(1. College of Ecology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Southern Modern Forestry Collaborative Innovation Center, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To study the effect of different buffer strips on phosphorus retention in runoff, and provide reference for the selection of suitable buffer zones and effective control of eutrophication in Taihu Lake. [Methods] Seven riparian buffer strips of 20 m x 40 m in Taihu Lake area were used to compare the effects of riparian buffer strips with different widths (15, 30 and 40 m), different vegetation types (*Populus × euramericana* 'Nanlin 95' plantation, *Taxodium* 'Zhongshanshan' plantation, and 'Nanlin 95' - 'Zhongshanshan' mixed plantation) and different stand densities (400, 1,000 and 1,600 tree·hm⁻²) on the retention of total phosphorus (TP) and soluble phosphorus (DP) in runoff water. [Results] (1) The interception of TP and DP in runoff water was significantly better in winter than in spring. The retention rate of DP in runoff water was significantly higher than that of TP in the buffer strips. (2) Different riparian buffer strips had different requirements for width. For *Taxodium* 'Zhongshanshan' forest, mixed forest, and poplar forest of 400 and 1000 tree·hm⁻², a 15m wide riparian buffer strip could basically meet the demand for phosphorus intercept. For the poplar forests with 1600 tree·hm⁻², a riparian buffer zone of more than 40 m width was required to meet the phosphorus retention requirement. (3) For the buffer zone of *Taxodium* 'Zhongshanshan' forest and poplar forest, the buffer strip with a stand density of 400 tree·hm⁻² had the best effect on the retention of TP and DP in runoff water. (4) The interception effect of *Taxodium* 'Zhongshanshan' forest buffer zone on phosphorus in runoff was better than that of mixed forest and poplar forest buffer zone, and *Taxodium* 'Zhongshanshan' could be used as the first choice for constructing riparian buffer strips in Taihu Lake. [Conclusion] The *Taxodium* 'Zhongshanshan' forest buffer strip with a width of 15 m and 400 tree·hm⁻² can achieve the maximum effect on phosphorus retention in runoff.

Keywords: riparian buffer strip; phosphorus; width; stand density; vegetation type; removal rate

(责任编辑: 张 研)