

茆安敏,吴永波,余昱莹. 杨树林河岸缓冲带对磷素的去除效果及机制研究[J]. 江苏农业科学,2019,47(6):259-262.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.06.055

杨树林河岸缓冲带对磷素的去除效果及机制研究

茆安敏^{1,2}, 吴永波^{1,2}, 余昱莹²

(1. 江苏省南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 2. 南京林业大学江苏省林业生态工程重点实验室, 江苏南京 210037)

摘要:研究了3个不同密度杨树林(南林95杨, Poplar Nanlin 95)河岸缓冲带在不同宽度对径流水中磷素的截留效果,测定水、土壤以及植物样内总磷和无机磷含量,分析河岸植被缓冲带截留磷素的机制。结果表明,杨树林河岸植被缓冲带的最佳宽度为30 m;15 m宽度即可截留60%的总磷;杨树林的最佳种植密度为1 600株/hm²。土壤对磷素的截留量是河岸植被缓冲带总截留量的80%。无机磷各组分中,能被植物直接吸收利用的磷酸二钙型磷(Ca₂-P)和磷酸八钙型磷(Ca₈-P)含量较低,且随宽度增加而降低;闭蓄态磷(O-P)和铁结合态磷(Fe-P)含量很高,和磷酸十钙型磷(Ca₁₀-P)三者含量随宽度增加没有明显变化。

关键词:杨树林河岸缓冲带;磷素;宽度;密度;无机磷;截留效果

中图分类号: S718.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)06-0259-04

农业面源污染及其造成的水资源短缺受到广泛关注。2007年5月太湖蓝藻爆发,严重影响了太湖流域地区人们的生活,造成重大经济损失^[1]。河岸植被缓冲带作为污染源和水体之间的过渡区域,通常被认为是减缓面源污染的重要途径之一^[2]。

植物吸收、土壤吸附和土壤微生物转化是河岸植被缓冲带去除磷素的3种主要途径,其去除效果与河岸带宽度、植被种类与密度、土壤性质等密不可分^[3]。Peterjohn等指出,当河岸植被缓冲带宽度为50 m时,可去除地表水中80%的磷^[4]。Wenger等指出,能有效截留磷素的缓冲带宽度至少为30 m及以上,且必须为森林缓冲带^[5]。何聪等得出的最佳宽度为12 m^[6]。王敏等得出,当宽度为16 m左右时,去除效果最佳^[7]。在植被类型研究中,人工林地对总磷的截留效率最

高,大于天然草地或人工草地^[8];乔木与草本的结合能提高磷素的净化效果^[9]。李睿华等研究得出,混合植物带对水中总磷的截留效率最高,达71%^[10],与Schmitt等的研究结果^[11]一致;而Duchemin等的研究结果表示,混合植物带与单一植物带的截留效率无显著差异^[12]。林分密度是河岸植被缓冲带实践操作中的重要指标,目前关于最佳林分密度的研究鲜见报道。

磷是动植物生长发育必需元素之一,农业上多通过施加大量磷肥提高作物产量,但磷极易被土壤吸附,其当季利用率很低,为20%左右^[13],因此易造成农业营养流失,进入水体形成富营养化。无机磷是农业土壤磷素的主体,但其各组分在土壤中含量和有效性差异较大,受土壤类型及外在施肥方式等影响^[14]。目前为止,直接研究河岸植被缓冲带对径流水中磷素的截留效果较多,由于土壤内部各种生物化学反应复杂万变,研究难度较大,因此截留机制方面研究较少。

杨树是太湖流域常见绿化树种,本研究探讨不同宽度与密度的杨树林河岸缓冲带截留磷素的差异,为构建适宜结构的杨树林河岸缓冲带提供科学依据。

收稿日期:2017-12-05

基金项目:国家林业局“948”项目(编号:2013-4-63);江苏省生物学优势学科建设项目。

作者简介:茆安敏(1992—),女,江苏宿迁人,硕士,主要从事湿地生态的研究。E-mail:nayiyi77@163.com。

通信作者:吴永波,博士,副教授,研究方向为森林生态、湿地生态。E-mail:yongbowu0920@163.com。

[15]张瑞娟,姜广辉,王明珠,等. 基于多维特征组合的农村居民点布局分类[J]. 农业工程学报,2015,31(4):286-292.

[16]Xi J C, Wang X G, Kong Q Q, et al. Spatial morphology evolution of rural settlements induced by tourism: a comparative study of three villages in Yesanpo tourism area, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 69(4):497-511.

[17]何仁伟,陈国阶,刘邵权,等. 中国乡村聚落地理研究进展及趋向[J]. 地理科学进展,2012,31(8):1055-1062.

[18]李红波,张小林. 国外乡村聚落地理研究进展及近况趋势[J]. 人文地理,2012,27(4):103-108.

[19]精河县人民政府. 精河年鉴(2015)[M]. 北京:中国文史出版社,2015:39-54.

[20]王曼曼,吴秀芹,吴斌,等. 盐池北部风沙区乡村聚落空间格

局演变分析[J]. 农业工程学报,2016,32(8):260-271.

[21]郭晓东,张启媛,马利邦. 山地-丘陵过渡区乡村聚落空间分布特征及其影响因素分析[J]. 经济地理,2012,32(10):114-120.

[22]马利邦,郭晓东,张启媛. 陇中黄土丘陵区乡村聚落的空间格局——以甘肃省通渭县为例[J]. 山地学报,2012,30(4):408-416.

[23]单勇兵,马晓冬,仇方道. 苏中地区乡村聚落的格局特征及类型划分[J]. 地理科学,2012,32(11):1340-1347.

[24]李红波,张小林,吴江国,等. 苏南地区乡村聚落空间格局及其驱动机制[J]. 地理科学,2014,34(4):438-446.

[25]沈陈华. 丹阳市农村居民点空间分布尺度特征及影响因素分析[J]. 农业工程学报,2012,28(22):261-268.

1 材料与方法

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的东部, $31^{\circ}07' \sim 31^{\circ}37'N$, $119^{\circ}31' \sim 120^{\circ}03'E$, 太湖西部沿岸, 属于亚热带季风气候, 全年温暖湿润, 年平均气温 $15.7^{\circ}C$, 夏季最热月平均气温 $28.3^{\circ}C$ 。7—8 月份日照时间最多, 雨量丰沛, 年平均降水日 136.6 d, 年平均降水量 1 177 mm。研究区土壤为中性黄棕壤, 土壤 pH 值为 6.2, 土壤容重为 $1.32 g/cm^3$ 。周边生活区主要以农业为主, 种植作物以水稻、小麦、油菜为主。

1.2 样地设置

在太湖边设置 4 个平行的 $20 m \times 40 m$ 样地, 坡度比 1:250。样地之间用挡板隔开, 防止相互影响。样地分别为不同林分密度的南林 95 杨树林 (Poplar Nanlin 95), 林分密度分别为 400、1 000、1 600 株/ hm^2 , 1 个样地为荒地, 作为对照。不同河岸植被缓冲带宽度 (0、15、30、40 m) 指采样点距样地施肥端的距离, 每个宽度处分别等距离埋设 3 组 PVC 淋溶管, 每组 2 根, 深度分别为 20、40 cm (图 1)。在距每个样地起始端 0~0.5 m 处施 5 kg 的复合肥 (N、 P_2O_5 、 K_2O 含量均为 15%), 利用降雨溶解肥料, 模拟农业面源污染进入河岸植被缓冲带。在降雨结束 2 周后采集每个宽度处的水样、土样及植物样, 并导出样地内气象站上从施肥到采样期间的降雨总量。本次试验在 2016 年 7 月 5 日施肥, 2016 年 7 月 20 日采样。

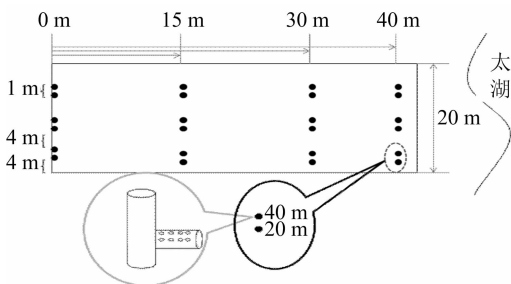


图1 样地设置示意

1.3 样品采集与处理

每个宽度处用土钻采取 0~20 cm 深度和 20~40 cm 深度的土壤, 装入自封袋并编号; 用抽水泵抽取 0~20 cm 深度和 20~40 cm 深度的水样, 装入 100 mL 聚乙烯瓶中并编号; 用铁锹挖取杨树细根, 装入自封袋并编号; 随机采取每组淋溶管 $1 m^2$ 范围内草本混合样, 装入自封袋并编号; 每个宽度处均设置 3 个重复, 共采取土样 96 个, 水样 96 个, 杨树细根样 48 个, 草本混合样 48 个。样本带回实验室及时测定。

1.4 分析方法与数据处理

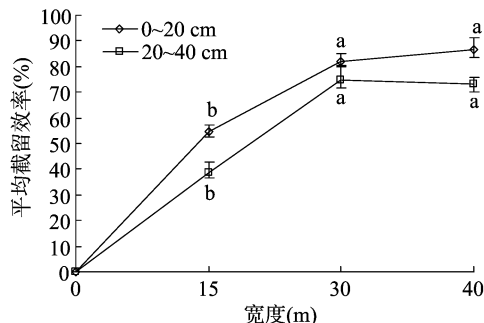
土壤总磷含量采用硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法测定; 土壤无机磷含量采用蒋柏藩-顾益初土壤无机磷分级方法^[15]测定; 水样总磷含量采用钼酸铵分光光度法测定; 植物总磷含量采用硫酸-过氧化氢法测定。

所有数据均采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 22.0 进行处理与统计分析。

2 结果与分析

2.1 河岸植被缓冲带对总磷的截留效果

2.1.1 不同宽度河岸植被缓冲带对总磷的截留效率 随着河岸植被缓冲带宽度增加, 4 块样地对径流水中总磷截留效率的平均值呈上升趋势 (图 2)。0~20 cm 深度径流水中总磷的被截留效率一直高于 20~40 cm 深度径流水。0~20 cm 深度径流水中总磷的被截留效率在 30 m 宽度处达到 81.8%, 在 40 m 宽度达到最大值 (86.58%); 20~40 cm 深度径流水中总磷的被截留效率在 30 m 宽度达到最大值 (74.91%), 随后降低, 但 30 m 宽度和 40 m 宽度之间无显著性差异 ($P=0.17$)。



不同字母表示不同宽度间差异显著 ($P<0.05$)。下图同图2 不同宽度缓冲带对径流水总磷截留率的变化

相邻宽度区间总磷含量的变化情况如图 3 所示。从图 3 可以得出, 总磷变化量随缓冲带宽度增加逐渐降低。0~15 m 宽度区间内总磷含量变化值最大, 表明 15 m 宽度即可有效截留大部分总磷, 约为总截留量的 60%。15~30 m 宽度内总磷变化值为正, 而除径流水外, 杨树细根、草本以及土壤的总磷含量变化值在 30~40 m 宽度区间均为负值, 表明 30 m 宽度后, 总磷含量增加, 且 30 m 宽度处总磷含量最低, 截留效率最高。因此可以得出杨树林河岸植被缓冲带的最适宽度为 30 m。

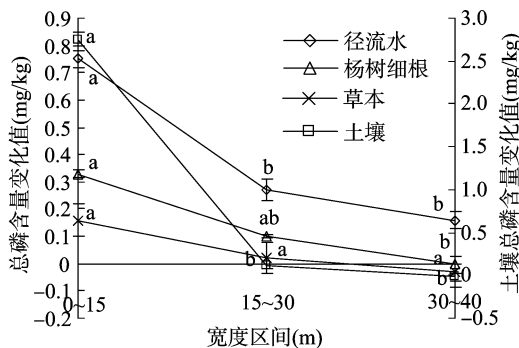
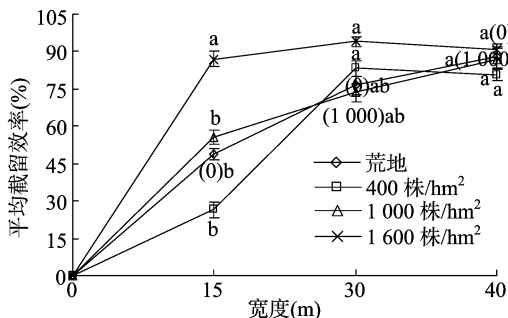


图3 不同相邻宽度区间总磷含量的变化值

2.1.2 不同杨树林密度河岸缓冲带对总磷的截留效率 不同密度杨树林的河岸缓冲带对总磷的截留率均较高, 且存在差异 (图 4、图 5)。1 600 株/ hm^2 杨树林对 0~20 cm 深度与 20~40 cm 深度径流水中总磷的截留率均高于其他 3 种样地类型。荒地和 1 000 株/ hm^2 杨树林对总磷的截留率呈持续上升趋势, 而 400 株/ hm^2 杨树林和 1 600 株/ hm^2 杨树林对总磷的截留率呈先快速上升后缓慢下降的趋势, 但截留率仍高于 1 000 株/ hm^2 杨树林。400 株/ hm^2 杨树林和 1 600 株/ hm^2 杨树林对总磷的截留率在 0~20 cm 深度径流水中具有显著性差异 ($P=0.043$), 在 20~40 cm 深度径流水中无显著性差异 ($P=0.082$)。结果表明, 河岸植被缓冲带杨树林的最适密度



“()”内为显著差异性字母所对应的林分密度。图5同
图4 不同密度杨树林缓冲带对0~20 cm深度径流水中总磷的截留效率

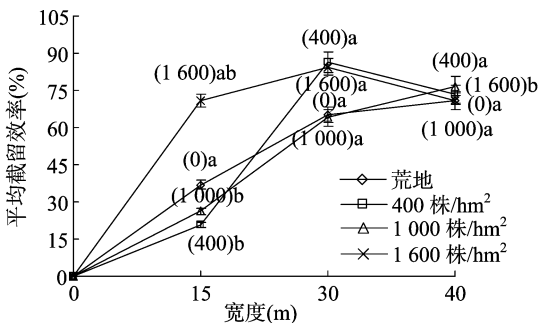


图5 不同密度杨树林缓冲带对20~40 cm深度径流水中总磷的截留效率

为1 600 株/hm²。

2.2 总磷在河岸植被缓冲带中的分布

河岸植被缓冲带对总磷的截留效果与缓冲带内截留因素有关,研究各截留因素对总磷的截留率有助于探讨河岸植被缓冲带去除磷素的机制。

不考虑磷在大气中转换等其他因素影响,假定进入河岸植被缓冲带的总磷全部被截留并只分布在水、土壤、杨树细根和草本4个部分中(为了计算方便,此过程将径流水作为截留因素)。将4个部分的截留总量作为整体,计算出各部分的截留率,即4个截留因素的截留率和为1,以此求出各截留因素对总磷的平均截留率(图6)。

从图6可以看出,进入河岸植被缓冲带的总磷,70%被土壤吸附,2.6%被杨树细根吸收,1.2%被草本吸收,26.2%随

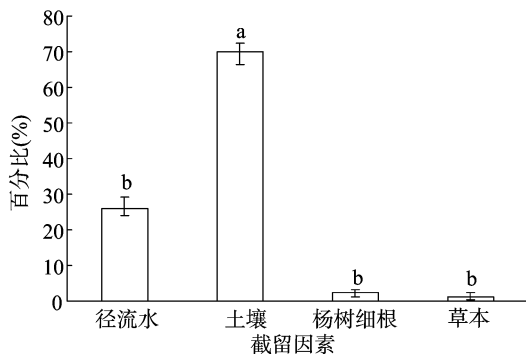


图6 各截留因素截留总磷量的百分比

径流水流出。土壤是总磷主要的截留因素,杨树细根的截留率是草本截留率的2倍。

2.3 河岸植被缓冲带土壤内无机磷含量变化

无机磷是农业土壤供磷的主体,占土壤总磷70%左右^[16]。研究土壤不同形态无机磷含量变化有利于进一步探讨河岸植被缓冲带去除磷素的机制。

不同深度土壤中无机磷各组分含量见表1。无机磷各组分含量中,闭蓄态磷(O-P)含量最高,依次为O-P>Fe-P>Ca₁₀-P>Al-P。在0~20 cm深度土壤,Ca₂-P>Ca₈-P;20~40 cm深度土壤,Ca₈-P>Ca₂-P,杨树的根系和草根主要分布在0~20 cm深度土壤中,而Ca₈-P更利于植物吸收。Ca₂-P和Ca₈-P在一定的土壤环境中可以相互转化。

表1 不同土壤深度中无机磷各组分含量值

土壤深度 (cm)	无机磷各组分含量(mg/kg)					
	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
0~20	3.08	0.73	12.3	129.99	284.67	82.53
20~40	0.97	1.08	7.91	117.77	242.24	89.6

无机磷各组分含量随缓冲带宽度变化情况如图7所示,Ca₂-P和Ca₈-P含量随缓冲带宽度增加而降低,Al-P随宽度增加呈下降趋势,这3种形态的无机磷都可以被植物直接或间接吸收利用。O-P、Fe-P和Ca₁₀-P含量随宽度增加无明显变化。Fe-P难溶于水,为缓效磷;O-P和Ca₁₀-P在短时间内均为无效磷,此3种状态磷均不能被植被吸收利用。以上结果表明,O-P、Fe-P和Ca₁₀-P是土壤总磷的主体,其含量在短时间内无明显变化。

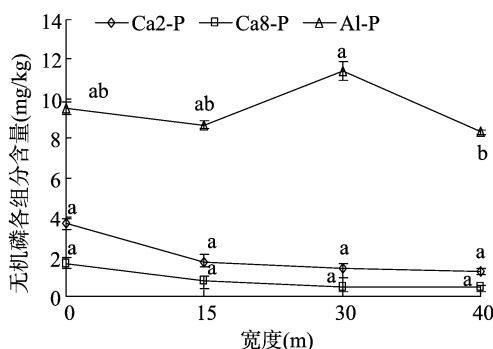
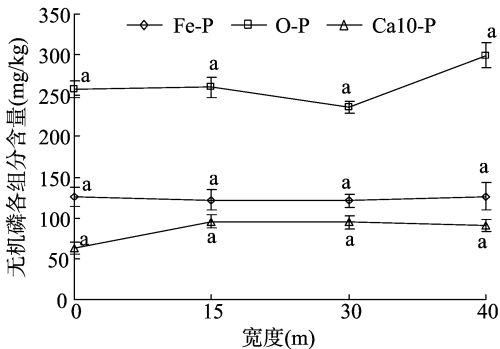


图7 无机磷各组分含量随河岸植被缓冲带宽度的变化

3 结论与讨论

3.1 杨树林河岸植被缓冲带的最佳配置

河岸植被缓冲带是防治水域污染最有效的措施之一,但其截留污染物的能力与地理因素、水文因素、气象因素以及自身配置情况等各种因素相关。本研究发现截留磷素效率高的

杨树林河岸缓冲带的最适密度为 1 600 株/hm²,与卜晓莉等对河岸植被缓冲带杨树林的密度研究^[17]相一致,均得出杨树林对污染物的截留效果随林分密度增加而提高。朱颖等对中山杉林的研究也表现出相似的变化趋势^[18]。但与宋思铭研究得出最适林分密度为 1 074 株/hm²^[19]存在差异,这可能与林龄有关。随着林龄增加,林木生长与形态会发生明显变化,不同林木之间的竞争力亦会增强。

河岸植被缓冲带的最适宽度大小受坡度、污染物种类与浓度和土壤性质等多种因素有关。本研究得出河岸植被缓冲带径流水中总磷含量随宽度增加呈降低趋势,0~20 cm 深度径流水总磷的截留效率在 40 m 宽度达到最大值(86.58%);20~40 cm 深度径流水截留效率在 30 m 宽度达到最大值(74.91%)。杨树林河岸植被缓冲带对总磷的削减作用主要发生在前 15 m 宽度内,最适宽度为 30 m,与李怀恩等研究 N、P 的主要削减作用在前 10 m^[20]相一致,与美国农业部在耕地保育计划中推荐的河岸缓冲带宽度 20~30 m^[2]相一致。河岸植被缓冲带对总磷的截留效率在 15~30 m 宽度间变化缓慢,应将这个宽度区间细化,以进一步深入研究河岸植被缓冲带截留磷素的机制。

3.2 河岸植被缓冲带去除磷素机制

矿质磷肥极易被土壤吸附。磷在土壤内部的转化非常复杂,涉及多种酶、土壤动物、根系微生物以及土壤环境,并处于动态变化中。本研究得出,进入河岸植被缓冲带的磷肥 70% 被土壤截留,而土壤总磷中 70% 为无机磷。因此,无机磷各组分含量可反映土壤磷素的分布。一些研究土壤性质与无机磷各组分含量的试验表明,风化程度较高的红壤中,无机磷各组分含量表现为 O-P>Fe-P>Al-P>Ca-P;石灰性土壤表现为 Ca-P>O-P>Fe-P>Al-P;而黄棕壤则介于两者之间^[21-22]。无机磷各组分含量的变化可以直接体现土壤磷素的利用率。本试验样地土壤为黄棕壤,无机磷各组分含量表现为 O-P>Fe-P>Ca-P>Al-P,其中,O-P 和 Fe-P 含量很高,约为无机磷总量 80%,O-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 含量随宽度增加无明显变化,它们不能被植物直接利用,又难溶于水,因此在土壤中有累加量,Ca₂-P 和 Ca₈-P 含量很少,并随宽度增加明显下降。因此 70% 的磷肥被土壤截留。

本研究中河岸植被缓冲带的最适密度是建立在幼龄林为基础之上的,随着林龄增加,缓冲带截留与吸收磷素的能力将发生变化,需要持续监测和研究。

参考文献:

[1]朱广伟.太湖富营养化现状及原因分析[J].湖泊科学,2008,20(1):21-26.
 [2]汤家喜,孙丽娜,孙铁珩,等.河岸缓冲带对氮磷的截留转化及其生态恢复研究进展[J].生态环境学报,2012,21(8):1514-1520.
 [3]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.
 [4]Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest[J]. Ecology, 1984, 65(5):1466-1475.
 [5]Wenger S J, Fowler L. Protecting stream and river corridors creating effective local riparian buffer ordinances[R]. Carl Vinson Institute of Government, University of Georgia, 2000.
 [6]何 聪,刘璐嘉,王苏胜,等.不同宽度草皮缓冲带对农田径流氮磷去除效果研究[J].水土保持研究,2014,21(4):55-58.
 [7]王 敏,吴建强,黄沈发,等.不同坡度缓冲带径流污染净化效果及其最佳宽度[J].生态学报,2008,28(10):4951-4956.
 [8]阎丽凤,石险峰,于立忠,等.沈阳地区河岸植被缓冲带对氮、磷的削减效果研究[J].中国生态农业学报,2011,19(2):403-408.
 [9]吴 健,王 敏,吴建强,等.滨岸缓冲带植物群落优化配置试验研究[J].生态与农村环境学报,2008,24(4):42-45,52.
 [10]李睿华,管运涛,何 苗,等.河岸混合植物带改善河水水质的现场研究[J].环境工程学报,2007,8(6):60-64.
 [11]Schmitt T J, Dosskey M G, Hoagland K D. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(5):1479-1489.
 [12]Duchemin M, Hogue R. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada) [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 131(1/2):85-97.
 [13]鲁如坤,时正元,顾益出.土壤积累态磷研究与磷肥的表观积累利用率[J].土壤通讯,1995,27(6):286-289.
 [14]齐雁冰,常庆瑞,田 康,等.黄土丘陵沟壑区不同植被恢复模式土壤无机磷形态分布特征[J].农业环境科学学报,2013,32(1):56-62.
 [15]蒋柏藩,顾益初.石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J].中国农业科学,1989,22(3):58-66.
 [16]胡 宁,袁 红,蓝家程,等.岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷形态特征及影响因素[J].生态学报,2014,34(24):7393-7402.
 [17]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.
 [18]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.
 [19]宋思铭.河岸缓冲带净水效果及优化配置技术研究[D].北京:北京林业大学,2012.
 [20]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.
 [21]向万胜,黄 敏,李学垣.土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6):663-670.
 [22]刘树堂,韩晓日,迟 睿,等.长期定位施肥对无石灰性潮土磷素状况的影响[J].水土保持学报,2005,19(5):45-48,62.