

## 南方地区水源塘坝保护的植被措施综合评价

朱寿建 (中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏南京 210000)

**摘要** 在野外实地建立了高羊茅+小叶女贞的植被组合条件下的3种不同过滤带宽度(2、3、4 m)和过滤带宽度为3 m条件下的5种不同植被组合(高羊茅+小叶女贞、三叶草+小叶女贞、高羊茅+火棘、三叶草+火棘、高羊茅+小叶女贞+碎石覆盖)以及空白对照组共8组试验小区,监测了2017年6月—2018年3月共计5场不同强度的自然降雨(23.0~100.2 mm/h)条件下每次降雨后的出流量、出流泥沙量、出流总氮浓度以及出流总磷浓度。结果表明,在过滤带宽度一致时,高羊茅+小叶女贞的植被配置模式净化效果最好。高羊茅+小叶女贞的植被组合过滤带的宽度为4 m时,相比于宽度为2和3 m的情况下,出流量、出流泥沙量、出流总氮浓度以及出流总磷浓度均为最低。通过建立塘坝复合植被过滤带工程评价指标体系,分别对不同植被组合配置模式进行打分,结果表明,5种植被过滤带不同植被组合配置模式中高羊茅+小叶女贞+碎石覆盖(C5)总得分最高(91.5分),明显高于其他类型的配置模式,说明在拦沙截污、生态、经济等方面综合效果作用最好,在该研究区复合植被过滤带工程中值得优选。该研究结果可为植被过滤带技术的应用和推广提供理论依据。

**关键词** 植被过滤带;植物种类;宽度;综合评价;定量计算

**中图分类号** S714.7 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2020)11-0100-04

**doi**:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.11.029



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Comprehensive Evaluation of Vegetative Filter Strips of Ponds and Dams in Southern China

ZHU Shou-jian (China Energy Engineering Group Jiangsu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000)

**Abstract** Three different filter bandwidth (2, 3, 4 m) of the tall fescue and ligustrum microphylla vegetation combination, and five different vegetation combinations (tall fescue + Ligustrum microphylla, clover + Ligustrum microphylla, tall fescue + pyracantha, clover + pyracantha, tall fescue + Ligustrum microphylla + gravel mulch) and control group were established in the field. The outflow water, outflow sediment, outflow total nitrogen concentration and outflow total phosphorus concentration after each rainfall were measured during five different intensities (23.0–100.2 mm/h) of natural rainfall from June 2017 to March 2018. The results showed that the tall fescue combined with Ligustrum lucidum was most effective among all the tested vegetation combinations at reducing soil loss and intercepting pollutants when the filter bandwidth was the same. When the width of the combined filter belt of tall fescue and Ligustrum lucidum was 4 m, the effluent water, sediment, nitrogen and phosphorus concentration were lower than the conditions that the width was 2 m or 3 m. Through establishing an evaluation index system of the vegetative filter strips of ponds and dams, the different vegetation filter strips were scored. The results showed that the score of tall fescue combined with Ligustrum microphylla and gravel cover was significantly higher than the other four different vegetation combination allocation modes in the filtered zone. The results indicated that this filter belt had the best comprehensive effects on soil interception, ecology and economy benefits, and it deserved to be optimized in the project of the composite vegetation filter zone in the study area. This study can provide a theoretical basis for the application and popularization of vegetation filter belt technology.

**Key words** Vegetative filter strips; Plant species; Width; Comprehensive evaluation; Quantitative design

我国南方地区塘坝是极为常见的贮存和拦蓄地表径流的蓄水设施,其具有农业灌溉、调蓄雨洪资源、防止水土侵蚀及拦截面源污染物等重要功能。随着塘坝的上游农业活动的发展,泥沙、氮磷污染物和生活垃圾随径流汇水进入塘坝的污水而增长,引起塘坝淤塞、水体环境恶化乃至生态功能丧失等问题。植被过滤带是位于污染源和水体之间的由乔木、灌木、草或农作物构成的带状植被<sup>[1]</sup>,它可促进地表径流中污染物的沉降、过滤、稀释和吸收,在防治塘坝遭受泥沙淤积和水体面源污染等方面作用显著<sup>[2-3]</sup>,目前已被欧美国家推荐为流域治理的一种有效措施<sup>[4-5]</sup>。不同植物种类的过滤带对水土和养分流失防护和污染物的净化效果差异极大,有的植被拦截效率不到30%,有的则可达90%以上<sup>[4-5]</sup>。草地过滤带可以有效地减少径流量和截留径流沉积物,但由于草本植物生物量小且根系浅,其在拦截地下侧向流及营养物方面的效果则低于林木过滤带。林木过滤带由于根茎系统深,能更好地吸收去除氮磷等营养物<sup>[6-11]</sup>。植被过滤带的宽度对污染物去除效果具有显著影响,一般而言,污染物拦截效

果随宽度的增加而增强<sup>[8-13]</sup>。因此确定最适宽度可以在增强去污效果与减少占地面积之间达到平衡,是设计植被过滤带时首先考虑的问题,但目前相关研究存在较大争议。Dhondt等<sup>[14]</sup>研究表明植被过滤带宽度达到5~8 m即可去除径流中的全部硝态氮,但Dosskey<sup>[15]</sup>认为宽度至少应增至30 m。分析已有研究可知,植被过滤带最适宽度是目前研究最多、同时也是争议最大的问题,相关研究结果存在数倍、甚至数十倍的差异,基本不具有可比性。这一状况可能与不同研究区的气候特征、土壤类型、所选植物种类、所需去除污染物等因素有关。因此在某一特定地区,应综合考虑上述因素,根据当地气候、土壤性质等条件确定该区植被过滤带的最适植被类型和最适宽度,同时完善植被过滤带的综合评价体系。该研究通过试验研究,探索和评估不同植被种类组合与不同宽度的植被过滤带对泥沙淤积和氮磷污染物的防治效果,为植被过滤带技术的应用和推广提供理论依据。

### 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 试验选在南京市江宁区,区内地质条件复杂,地势南北高而中间低,丘陵岗地面积最大。境内有大小山丘400个,山体高度都在海拔400 m以下,属典型的丘陵、平原地貌。江宁区属北亚热带季风气候区,气候温和,年

**作者简介** 朱寿建(1977—),男,江苏涟水人,高级工程师,从事水利、电力等领域规划设计研究。

**收稿日期** 2019-10-06

平均气温 15.7℃;无霜期长,平均无霜期为 224 d;雨水充沛,年平均降水量为 1 072.9 mm。雨热同季,天气的变化比较复杂,常出现春秋季节低温冷害、雨涝、台风、寒潮、干旱、冰雹、雷雨大风等灾害性天气。年极端最低气温-13.3℃,年极端最高气温为 40.4℃。

**1.2 野外小区试验** 对复合植被过滤带的植物配置模式与植被过滤带的宽度进行了相应的选取与计算,配置模式包括高羊茅+小叶女贞、三叶草+小叶女贞、高羊毛+火棘、三叶草+火棘、高羊茅+小叶女贞+碎石覆盖,在试验区所选取坡地上设置相对应的 5 种不同的植被过滤带配置模式的径流小区,对典型配置高羊茅+小叶女贞模式设置 3 个不同宽度,分别为 2、3、4 m,其余配置模式宽度皆为 3 m,每 0.5 m 设置一种植物,另外设置一个空白对照,共 8 个植被过滤带。相邻的 2 条植被过滤带之间均铺设了防渗膜,分隔为 8 个小区,每个小区水平方向的宽度皆为 1.5 m,具体布置方式及配置模式编号如表 1 所示。在每条植被过滤带出流处修建一个沉砂池,沉砂池(带盖以避免降雨落入产生水量)出口处设置阀门,连接水表,用以观测每次降雨前后各个小区产流量、产沙量及径流污染物浓度比较。

表 1 植被过滤带配置模式

Table 1 Vegetation filter belt configuration mode

小区编号 Plot No.	VFS 配置模式 VFS configuration mode	宽度 Width/m
1	高羊茅+小叶女贞	2
2	高羊茅+小叶女贞	3
3	高羊茅+小叶女贞	4
4	三叶草+小叶女贞	3
5	高羊毛+火棘	3
6	三叶草+火棘	3
7	高羊茅+小叶女贞+碎石覆盖	3
8	对照	—

每次降雨前对沉砂池进行清理,保证沉砂池内无干燥、无泥沙及污染物。在每次降雨过程中关闭所有沉砂池出口处阀门,降雨完成后,待沉砂池内泥沙沉淀完成,按编号依次收集各沉砂池内 250 mL 上层清液、过滤,用以测定总氮、总磷浓度。待取完待测液后,打开全部出流阀门,沉砂池内液体全部经阀门与水表流出,待全部流出后,依次记录各水表示数,得到各沉砂池内的水量。收集沉砂池内沉淀下来的泥沙,烘干称重,计算得到各个小区在一次降雨完成后所产生的泥沙量。

### 1.3 塘坝复合植被过滤带配置模式综合评价与优选

**1.3.1 塘坝复合植被过滤带工程评价指标体系的构建。**为科学引导江宁区塘坝复合植被过滤带的建设,科学评估复合植被过滤带,建立江宁区经济发展和环境保护相适宜的复合植被过滤带评价指标体系,其各层次指标见下表 2。

塘坝复合植被过滤带工程评价指标体系分为一级指标和二级指标。一级指标分别为拦沙截污效益( $B_1$ )、经济效益( $B_2$ )和生态效益( $B_3$ )。一级指标拦沙截污效益( $B_1$ )包括泥沙拦截率( $C_1$ )、总氮拦截率( $C_2$ )和总磷拦截率( $C_3$ )3 个二级

指标;一级指标经济效益( $B_2$ )包含工程成本( $C_4$ )、环保经济效益( $C_5$ )和施工工艺( $C_6$ )3 个二级指标;一级指标生态效益( $B_3$ )包括生物多样性( $C_7$ )和景观效益( $C_8$ )2 个二级指标。根据已测得的数据,利用层次分析法(AHP)计算求得各一级指标和二级指标的权重值(表 3)。根据专家和有关学者的意见,采用标度法将同一层次中指标之间进行两两比较,各专家运用 1~9 标度法来构建判断矩阵。

表 2 塘坝复合植被过滤带工程评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of Tangba composite vegetation filter

belt project		
一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	备注 Remarks
拦沙截污效益 Sand interception and interception benefits( $B_1$ )	泥沙拦截率( $C_1$ )	反映不同复合植被过滤带对坡面产沙的拦截效果
	总氮拦截率( $C_2$ )	反映不同复合植被过滤带对坡面总氮的拦截效果
	总磷拦截率( $C_3$ )	反映不同复合植被过滤带对坡面总磷的拦截效果
经济效益 Economic benefits( $B_2$ )	工程成本( $C_4$ )	是指不同植被过滤带造价的高低
	环保经济效益( $C_5$ )	是指建设植被过滤带后所带来的环保效果
	施工工艺( $C_6$ )	是指植被过滤带建设水平的复杂与难易程度
生态效益 Ecological benefits( $B_3$ )	生物多样性( $C_7$ )	反映植被过滤带内动植物多样性特征
	景观效益( $C_8$ )	反映项目对项目区生态景观发展的贡献

表 3 塘坝复合植被过滤带工程评价指标体系中各指标的权重

Table 3 Weights of indicators in the evaluation index system for the Tangba composite vegetation filter belt project

总目标 Total objective	一级指标 Primary indicator	权重 Weight	二级指标 Secondary indicator	权重 Weight
渠道综合评价 Comprehensive channel evaluation	拦沙截污效益( $B_1$ )	0.637 0	泥沙拦截率( $C_1$ )	0.213 3
			总氮拦截率( $C_2$ )	0.213 3
			总磷拦截率( $C_3$ )	0.213 3
	经济效益( $B_2$ )	0.258 3	工程成本( $C_4$ )	0.085 9
			环保经济效益( $C_5$ )	0.136 3
			施工工艺( $C_6$ )	0.036 1
生态效益( $B_3$ )	0.104 7	生物多样性( $C_7$ )	0.091 6	
		景观效益( $C_8$ )	0.013 1	

**1.3.2 塘坝复合植被过滤带配置模式综合评价与优选。**将江宁区塘坝复合植被过滤带工程评价指标体系的各种指标分为 4 个等级(很好、好、一般、差),而且这 4 个分别用 100、80、60、40 来代替。达到目标值为很好,其余与参考值作比较求隶属度,其指标标准如表 4 所示。根据计算结果,植被过滤带宽度在 3 m 比较适宜,为控制变量,所以以上复合植被过滤带的宽度保持一致,均为 3 m。通过 Triangular Fuzzy(三角模糊)模型中模糊函数的方法确定具体每个指标的隶属度函数值。利用 Matlab 程序和指标的最低值、基准值分别求出每个指标相对应  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, \}$  = {很好,好,一般,差},指标的标准值分别为  $\{d_1, d_2, d_3, d_4, \}$ ,实际值为  $X$ ,此过程和结果由数值表示。然后按照 Triangular Fuzzy 模型求出每个指标的隶属度。

表4 塘坝复合植被过滤带工程指标标准

Table 4 Engineering index standard of Tangba composite vegetation filter belt

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	很好 Very good	好 Good	一般 Ordinary	差 Bad
拦沙截污效益 Sand interception and interception benefits (B <sub>1</sub> )	泥沙拦截率(C <sub>1</sub> )	0.80	0.70	0.60	0.50
	总氮拦截率(C <sub>2</sub> )	0.50	0.40	0.30	0.20
	总磷拦截率(C <sub>3</sub> )	0.50	0.40	0.30	0.20
经济效益 Economic benefits (B <sub>2</sub> )	工程成本(C <sub>4</sub> )	5 000	10 000	15 000	20 000
	环保经济效益(C <sub>5</sub> )	0.50	0.40	0.30	0.20
	施工工艺(C <sub>6</sub> )	0.6	0.7	0.8	0.9
生态效益 Ecological benefits (B <sub>3</sub> )	生物多样性(C <sub>7</sub> )	0.75	0.65	0.45	0.15
	景观效益(C <sub>8</sub> )	1.0	0.8	0.6	0.4

## 2 结果与分析

**2.1 野外小区观测试验** 在野外小区的试验中,共进行了5次降雨径流观测试验。在2017年6月6日、2017年8月28日、2017年9月25日、2018年1月4日、2018年3月15日各次监测的降雨强度分别为35.1、27.8、100.2、23.0、51.2 mm/h。各次监测得到8个过滤带在每次降雨后的出流水量、出流泥沙量、出流总氮浓度以及出流总磷浓度。按照

降雨强度由大到小的排序,产沙量与总磷浓度随过滤带长度与植被组合的变化分别如图1所示。

由5次降雨后的观测结果,通过对8个小区出流结果比较,可以发现不同植被配置模式及同一植被配置模式下不同宽度植被过滤带对地表径流、泥沙、总氮以及总磷的拦截效果皆有差异。在5次观测试验中,通过比较1#、2#、3#小区的出流情况发现,宽度为4 m的3#小区在5次观测试验中出流量、泥沙量、泥沙浓度及总氮、总磷浓度都比宽度为2 m和3 m的小区小,说明宽度为4 m的3#植被过滤带小区对地表径流、泥沙及总氮、总磷的拦截效果要优于另外2个宽度的小区。在2017年8月28日(降雨强度27.8 mm/h)的观测试验中,3#小区出流泥沙量非常微弱,不足以取样,基本为0,可以证明在此次观测试验中长度为4 m的高羊茅+小叶女贞的配置模式过滤带对泥沙的拦截效果非常好,接近于100%,原因可能在于此次观测试验中的降雨量较小,导致出流量及其所携泥沙含量都较小。此外,宽度为3 m的2#植被过滤带小区对地表径流、泥沙及总氮、总磷的拦截效果优于宽度为2 m的1#小区。由此可见,在该研究野外小区降雨径流观测试验中,植被过滤带宽度越大,对径流、泥沙及氮磷污染物的拦截效果越好。

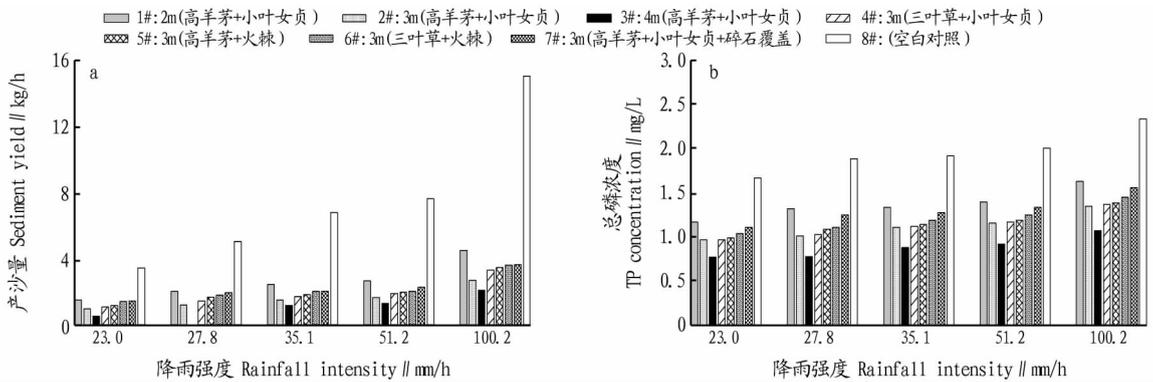


图1 不同降雨强度条件下产沙量(a)和总磷浓度(b)随过滤带长度与植被组合的变化

Fig. 1 Variation of sediment yield (a) and total phosphorus concentration (b) with filter belt length and vegetation combination under different rainfall intensities

比较8个径流小区的拦截效果,出流量、出流泥沙浓度、出流总氮、总磷浓度从大到小依次为8#、1#、7#、6#、5#、4#、2#、3#,表明在该研究的野外小区径流观测试验中,8个小区对于径流、泥沙及氮磷污染物的拦截效果从大到小依次为3#、2#、4#、5#、6#、7#、1#、8#。在过滤带宽度一致时,高羊茅+小叶女贞的植被配置模式净化效果最好。对于同种配置模式,植被过滤带宽度越大,净化效果越好。但是,示范区的局限性只能确定在设置的3种宽度中,宽度与净化效果呈正相关,并不能确定宽度大小是否存在一个阈值,还有待深入研究。

**2.2 塘坝复合植被过滤带配置模式综合评价及优选** 通过上述所求的一级和二级模糊综合评价值,分别对准则层和目标层进行打分。塘坝复合植被过滤带工程准则层的隶属度及得分情况如表5所示。从隶属度及得分情况可以得出,5种不同的配置模式中高羊茅+小叶女贞+碎石覆盖(7#)的拦

沙截污效果最好,总得分为96分,而三叶草+火棘(6#)的拦沙截污效果最差,得分最低。其他3种不同的植被配置模式相较于无植被过滤带则均有不同程度的拦沙截污效果。

表5 复合植被过滤带工程拦沙截污效益的隶属度及得分情况

Table 5 Membership and scores of sand interception and interception benefits of composite vegetation filter belt projects

小区编号 Plot No.	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	得分 Score
2	0.594 7	0.404 3	0	0	92
4	0.366 3	0.632 7	0	0	87
5	0.230 1	0.768 9	0	0	85
6	0.044 0	0.889 1	0.065 9	0	79
7	0.795 9	0.203 1	0	0	96

借助模糊综合评价法,建立二级模糊评价模型,综合考虑三大因素(防渗效益、经济效益、生态效益),从而进行打分

并优选生态防渗渠道。对江宁区塘坝复合植被过滤带实现目标的程度进行综合评判,结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,考虑综合因素,统筹兼顾,5 种不同配置模式中高羊茅+小叶女贞+碎石覆盖(C<sub>5</sub>)总得分最高,总得分为 91.5,相比其他类型的配置模式无疑处在优级,这说明在拦沙截污、生态、经济等方面综合效果作用非常好,在复合植被过滤带工程中值得优选。此外,植被过滤带的宽度也是影响其作用的一个因素,这里只是讨论了配置模式的优选,对于其宽度的优选需要根据实际应用情况进行选择。

表 6 复合植被过滤带工程总目标的隶属度及得分情况

Table 6 Membership and scores of the overall target of the composite vegetation filter belt projects

小区编号 Plot No.	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	得分 Score
2	0.528 6	0.418 0	0.054 3	0	89.6
4	0.317 3	0.592 1	0.089 9	0	84.5
5	0.274 8	0.566 3	0.158 2	0	82.3
6	0.152 8	0.625 6	0.182 7	0.038 2	77.8
7	0.624 9	0.325 8	0.048 6	0	91.5

### 3 结论

(1) 过滤带宽度为 3 m 条件下的 5 种不同植被组合(高羊茅+小叶女贞、三叶草+小叶女贞、高羊茅+火棘、三叶草+火棘、高羊茅+小叶女贞+碎石覆盖)条件下,高羊茅+小叶女贞的植被配置模式的出流量、出流泥沙量、出流总氮浓度以及出流总磷浓度均为最低,净化效果最好。高羊茅+小叶女贞的植被组合条件下的 3 种不同过滤带宽度(2、3、4 m)条件下,出流量、出流泥沙量、出流总氮浓度以及出流总磷浓度随过滤带宽度的增加而降低,过滤带的宽度为 4 m 时,净化效果最好。

(2) 通过建立塘坝复合植被过滤带工程评价指标体系,分别对不同植被组合配置模式进行打分。结果表明,5 种植物过滤带不同植被组合配置模式中高羊茅+小叶女贞+碎石覆盖(C<sub>5</sub>)总得分最高,总得分为 91.5,明显高于其他类型的

配置模式,说明在拦沙截污、生态、经济等方面综合效果作用最好,在本研究区复合植被过滤带工程中值得优选。

### 参考文献

- [1] NAIMAN R J, DÉCAMPS H. The ecology of interfaces: Riparian zones[J]. *Ann Rev Ecol Syst*, 1997, 28: 621-658.
- [2] 王良民, 王彦辉. 植被过滤带的研究和应用进展[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 2074-2080.
- [3] 李怀恩, 张亚平, 蔡明, 等. 植被过滤带的定量计算方法[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(1): 108-112.
- [4] 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.
- [5] REED T, CARPENTER S R. Comparison of P-yield, riparian buffer strips, and land cover in six agricultural watersheds[J]. *Ecosystems*, 2002, 5(6): 568-577.
- [6] 黄欠如, 章新亮, 李清平, 等. 香根草篱防治红壤坡耕地侵蚀效果的研究[J]. *江西农业学报*, 2001, 13(2): 40-44.
- [7] 范洪杰, 黄欠如, 秦江海, 等. 稻草覆盖和草篱对红壤缓坡旱地水土流失及作物产量的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(3): 550-554.
- [8] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 等高植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 71-80.
- [9] CAO L X, ZHANG Y G, LU H Z, et al. Grass hedge effects on controlling soil loss from concentrated flow: A case study in the red soil region of China[J]. *Soil and tillage research*, 2015, 148(5): 97-105.
- [10] 许开平, 吴家森, 黄程鹏, 等. 不同植物篱在减少雷竹林氮磷渗漏流失中的作用[J]. *土壤学报*, 2012, 49(5): 980-987.
- [11] SHIONO T, YAMAMOTO N, HARAGUCHI N, et al. Performance of grass strips for sediment control in Okinawa[J]. *Japan agricultural research quarterly*, 2007, 41(4): 291-297.
- [12] CASTELLE A J, JOHNSON A W, CONOLLY C. Wetlands and stream buffer size requirements - A review[J]. *Journal of environmental quality*, 1994, 23(5): 878-882.
- [13] ABU-ZREIG M, RUDRA R P, WHITELEY H R, et al. Phosphorus removal in vegetated filters trips[J]. *Journal of environmental quality*, 2003, 32(2): 613-619.
- [14] 申小波, 陈传胜, 张章, 等. 不同宽度模拟植被过滤带对农田径流、泥沙以及氮磷的拦截效果[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(4): 721-729.
- [15] 付婧, 王云琦, 马超, 等. 植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 1-8.
- [16] DHONDT K, BOECKX P, CLEEMPUT O V, et al. Seasonal ground water nitrate dynamics in a riparian buffer zone[J]. *Agronomie*, 2002, 22: 747-753.
- [17] DOSSKEY M G. Toward quantifying water pollution abatement in response to installing buffers on crop land[J]. *Environmental management*, 2001, 28: 577-598.