



不同配置乡村植被缓冲带阻控径流污染特征研究

张靖雨, 夏小林, 汪邦稳, 张世杰, 陈磊, 龙昶宇

引用本文:

张靖雨, 夏小林, 汪邦稳, 张世杰, 陈磊, 龙昶宇. 不同配置乡村植被缓冲带阻控径流污染特征研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(2): 383–391.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0250>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律

王月, 房云清, 纪婧, 秦弋丰, 马瑞君, 李旭东

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(6): 814–821 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0210>

麦季农田流失养分植物拦截技术体系研究

刘红江, 郑建初, 孙国峰, 盛婧, 张岳芳, 郭智, 周炜, 陈留根

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(4): 611–617 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0424>

牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响

普燕爽, 王春雪, 陈建军, 李元, 祖艳群, 张克强

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(2): 286–294 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0270>

自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响

彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 唐柄哲

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(4): 318–326 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0045>

洱海流域不同轮作与施肥方式对农田氮磷径流损失的影响

姚金玲, 郭海刚, 倪喜云, 王风, 郑宏艳, 杨怀钦, 杨苏树, 任天志

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(5): 600–613 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0039>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张靖雨, 夏小林, 汪邦稳, 等. 不同配置乡村植被缓冲带阻控径流污染特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 383–391.  
ZHANG J Y, XIA X L, WANG B W, et al. Study on the characteristics of runoff pollution control in different configurations of rural  
vegetation buffer strips[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 383–391.



开放科学 OSID

# 不同配置乡村植被缓冲带阻控径流污染特征研究

张靖雨<sup>1,2</sup>, 夏小林<sup>1,2</sup>, 汪邦稳<sup>1,2\*</sup>, 张世杰<sup>1,2</sup>, 陈磊<sup>1,2</sup>, 龙昶宇<sup>1,2</sup>

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 合肥 230088; 2. 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

**摘要:** 植被缓冲带是河湖的重要生态空间屏障, 对于减缓人类活动对河湖的直接干扰、阻隔农业面源污染等具有重要意义。为系统研究不同类型缓冲带对农田氮磷等污染物的拦截功效, 本研究在定远张山设计 8 个缓冲带小区, 结合自然降雨方式, 持续两年观测不同缓冲带对地表径流及其主要污染物(TN、TP、COD)的削减效果。结果表明: 林地和 3°、8°横垄耕地缓冲带对径流的拦截效率较高, 减流率分别达到了 62.4%、52.0% 和 60.6%, 径流量随雨强增大先升高后下降。与 8°坡耕地缓冲带相比, 降坡(3°)处理竖垄、横垄缓冲带泥沙流失量分别降低 53.3%、50.9%。降雨产流的养分流失以氮素和有机质为主, 林地缓冲带对径流 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的拦截率平均高达 95.2%, 此外降坡和横垄耕作措施也能有效减少径流冲刷的氮素流失。不同处理缓冲带对径流 TP 均有较好的拦蓄效果。3°、8°横垄耕地缓冲带 COD<sub>Mn</sub> 流失量较低, 拦截率达到 53.0%、58.6%。林地缓冲带中高覆盖度的植被和发达的根系能够有效减缓降雨对地表的冲刷, 减少径流和养分流失。在南方丘陵山地的乡村地区实施横坡垄作是拦蓄径流、降低面源污染风险的有效措施。

**关键词:** 植被缓冲带; 农业面源污染; 径流; 泥沙; 氮磷流失

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 2095–6819(2024)02–0383–09

doi: 10.13254/j.jare.2023.0250

## Study on the characteristics of runoff pollution control in different configurations of rural vegetation buffer strips

ZHANG Jingyu<sup>1,2</sup>, XIA Xiaolin<sup>1,2</sup>, WANG Bangwen<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Shijie<sup>1,2</sup>, CHEN Lei<sup>1,2</sup>, LONG Changyu<sup>1,2</sup>

(1. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources, Bengbu 233000, China)

**Abstract:** A vegetation buffer strip is an important spatial barrier in rivers and lakes. It is used to alleviate the direct interference of human activities on rivers and lakes and block agricultural nonpoint source pollution. Eight buffer strips were designed in a small watershed Dingyuan in Zhangshan to systematically study the effect of interception provided by different types of buffer strips on pollutants such as N and P in farmland. Combined with natural rainfall methods, the reduction effects of different buffer strips on surface runoff and its main pollutants such as total N (TN), total P (TP), and chemical oxygen demand (COD) were observed for two years. The results showed that forest land and 3° and 8° cross-ridge tillage buffer had the highest runoff interception efficiency, with interception rates of 62.4%, 52.0%, and 60.6% for TN, TP, and COD, respectively. The runoff increased first and then decreased with the increase of rainfall intensity. Compared with the 8° slope treatment, the sediment reduction rates of the cultivated land buffer zone in the downhill (3°) treatment for vertical ridge and cross-ridge were 53.3% and 50.9%. The nutrient loss of rainfall runoff on the slope was mainly composed of N and organic matter, the average interception rate of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in the runoff was as high as 95.2%. All buffer strips had good retention effect on TP in the runoff, and the loss of COD<sub>Mn</sub> on the slope of 3° and 8° cross-ridge cultivation was the lowest, and the interception rate reached 53.0% and 58.6%. Our results indicated that the presence of high coverage vegetation and developed roots in the forest buffer strip can effectively slow down the erosion caused by rainfall on the surface and reduce runoff and nutrient loss. The implementation of cross-ridge

收稿日期: 2023–04–20 录用日期: 2023–07–06

作者简介: 张靖雨(1988—), 男, 安徽凤阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为水污染处理、水生态修复。E-mail: qingrelation@163.com

\*通信作者: 汪邦稳 E-mail: bangwenbest@126.com

基金项目: 安徽省自然科学基金项目联合基金(2208085US10, 2208085US21); 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院青年创新计划项目(KY202102)

**Project supported:** The Natural Science Foundation of Anhui Province, China(2208085US10, 2208085US21); The Youth Innovation Plan Project of Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research(KY202102)

cultivation in rural hilly and mountainous areas in the south is also an effective measure to retain runoff and reduce the risk of nonpoint source pollution.

**Keywords:** vegetation buffer strip; agricultural nonpoint source pollution; runoff; sediment; nitrogen and phosphorus loss

植被缓冲带是指利用植被拦截污染物或有害物质的条带状保护区域,是农田、河塘生态系统的重要载体。缓冲带可利用自身坡度高差以及多层次植被和土壤覆盖,通过滞缓径流流速、改善土壤结构、吸收利用部分氮磷有机质等一系列的物理、化学和生物作用实现污染净化<sup>[1-3]</sup>。作为水土流失和面源污染防治的天然生态屏障,植被缓冲带是一种行之有效且成本低廉的重要管理措施。

多数研究表明植被缓冲带对径流的削减率平均在30%~60%之间<sup>[4-5]</sup>,对泥沙的平均削减率能够达到50%~95%之间<sup>[6]</sup>。除持水减沙外,农田径流中超过50%的氮、磷会在缓冲带中进行转化、截留<sup>[7-8]</sup>。目前缓冲带阻隔面源污染的研究对象多以草地、林地类型为主,主要是因其具有高覆盖度和发达的根系以及附着在周围的微生物,这是缓冲带功能形成与维持的基础<sup>[9]</sup>。植被根系越发达、生物量越高,吸收和微生物降解作用越强<sup>[10-11]</sup>。一般认为,林地缓冲带对面源污染中氮、溶解态磷的去除效果更好,乔木植被缓冲带不仅具有较多的可利用有机碳,反硝化作用更强,而且植被根系范围广且相对较深,更有利于对溶解态氮磷的吸收。即使在休眠季节,森林类型的河岸缓冲带仍可截留转化全部的硝态氮,而多年生草地河岸带仅能截留转化84%的硝态氮<sup>[12]</sup>,而草本植被则对富集在表层的泥沙及其附着污染物(如难溶态颗粒磷等)拦截效果更明显。但在建立初期,乔木缓冲带植被根系还未发育完全,相比草本缓冲带,其拦截氮能力不会显著增加<sup>[13-14]</sup>。不同类型植被缓冲带受宽度、坡度、土壤耕作方式等因素影响显著,其氮、磷去除效率在10%~95%之间波动。因此在氮、磷截留转化过程中,林地缓冲带和草地缓冲带均具有重要作用,在构建缓冲带时应根据立地条件,适当参考不同类型缓冲带能够发挥的不同作用范围及优势来选择合适的缓冲带类型。

从区域上来看,多数试验聚焦在城市或城郊的河滨岸带区域,而对乡村地区关注较少。通常情况下,缓冲带是农田和河沟水体之间的过渡地带,但南方丘陵山地的乡村地区土地资源短缺,单独布置适宜宽度的林草植被缓冲带成本过高。农田耕地坡面受施肥、土地翻垦等活动影响,对降雨径流及养分的截留作用

往往较弱,已有调查研究发现林草等缓冲带对氮的截留率可达89%,而在农田的截留率仅为8%<sup>[15]</sup>。垄作是南方丘陵区常见的保土耕作措施之一,通过免耕、横垄等保护性耕作方式改变地表微地形和耕层结构,也能有效降低地表径流和养分的输出损失<sup>[16]</sup>,但翻耕会造成地表裸露,使土壤结构不稳定,过度翻耕极易造成土壤侵蚀<sup>[17]</sup>。目前,同步考虑耕地、林地等不同配置植被缓冲带对降雨径流截污能力的研究还较少,此外基于植被生长周期及生态系统的群落演替特征,缓冲带对水沙及其养分截留效率的动态变化规律也缺乏长期的观测论证。因此,有必要结合乡村区域的典型特征,开展长期观测试验,综合分析不同措施、不同植被覆盖等配置条件下乡村植被缓冲带水沙及养分的流失规律,筛选出结构合理、植物优化、功能良好的缓冲带类型,这对于防治坡地水土流失、提高乡村水生态综合治理效益具有重要的现实意义和工程价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 区域概况

研究区域选择在张山小流域综合观测站内,该监测站点建设于2019年,经土地平整沉降后于2021年正式投入使用。观测站地处安徽省滁州市定远县西卅店镇张庄村,地貌类型为丘陵岗地,土壤类型以黄褐土为主,占地面积0.67 hm<sup>2</sup>。该地区因坡耕地分布广、范围大,成为水土流失重点地区。观测站所在的流域为张山小流域,在淮河一级支流池河水系上游,面积约3.3 km<sup>2</sup>,其中林地面积约2.2 km<sup>2</sup>,耕地面积约1.1 km<sup>2</sup>。2021年观测站降水量为959.3 mm,降雨天数为105 d;2022年降水量为881.1 mm,降雨天数为80 d。

### 1.2 试验设计

在观测站内构建8个5 m×20 m的植被缓冲带小区(图1),分别为2个8°林地(1#、2#)、2个8°裸地(3#、4#)、2个8°坡耕地(5#竖垄、6#横垄)、2个3°坡耕地(7#竖垄、8#横垄)。小区边界设置混凝土围挡,坡耕地主要种植当地常见的花生、油菜,种植密度约30株·m<sup>-2</sup>。施用肥料为复合肥,折合纯量计288 kg·hm<sup>-2</sup>。林地小区主要树种为紫薇、海棠,平均树高1.2 m,林下覆盖植被主要为狗牙根草,平均高度0.15 m,



图1 植被缓冲带小区构建平面布置图

Figure 1 Layout plans of vegetation buffer strips

平均植被盖度55%。每个缓冲带小区末端设有不锈钢内衬的3级蓄水池,每级蓄水池采用5孔分流,用于每次降雨后收集坡面产流和泥沙。

### 1.3 采样与测试

利用构建的多种植被缓冲带开展为期2年(2021—2022年)的观测试验。其中2021年缓冲带有效产流次数为5次,2022年有效产流次数为13次。利用自动气象站记录降雨数据,在每次小区降雨产流结束后,通过收集池内超声波传感器记录水位数据,并及时将池中水体搅拌均匀后分2份采集带回实验室,放入冰箱冷冻保存,2 d内完成流失泥沙质量和水体污染指标测定。

径流泥沙质量采用质量法测定,径流水样理化性质指标分两部分完成测试:一部分不过滤,用全自动化学分析仪(Smartchem\_200)测试,总氮(TN)采用过硫酸钾分光光度法测定,总磷(TP)采用过硫酸钾氧

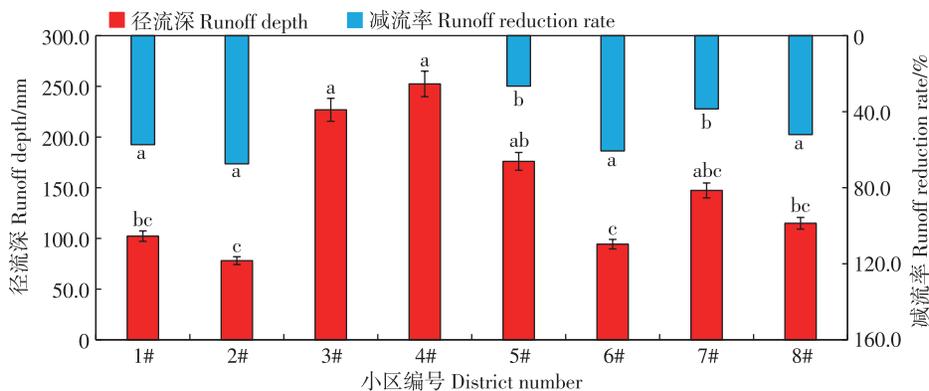
化-钼蓝比色法测定,COD采用高锰酸钾盐法测定;另一部分经 $0.45\ \mu\text{m}$ 的滤纸过滤后测定铵态氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ ),采用纳氏试剂比色法测定,具体测试方法参照《水和废水监测分析方法》。数据基础处理及图表制作采用Excel 2016软件,数据统计分析采用SPSS 22.0软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同缓冲带降雨产流分布特征

2021—2022年不同植被缓冲带降雨产流分布特征见图2。减流率=(裸地缓冲带径流深-不同配置植被缓冲带径流深)/裸地径流深,用以表征不同植被类型和不同措施条件对降雨径流的拦截效果。

由图2可知,不同处理的缓冲带小区径流量从大到小依次为裸地>8°竖垄耕地>3°竖垄耕地>横垄耕地>林地,其中裸地径流深平均达到239.6 mm,显著高于林



不同小写字母代表小区间差异显著( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant differences among districts( $P<0.05$ ).

图2 不同类型缓冲带降雨产流分布特征

Figure 2 Rainfall runoff distribution characteristics of different types of buffer strips

地和6#、8#耕地缓冲带。2#林地缓冲带平均径流深78.1 mm,6#横垄耕地缓冲带平均径流深94.3 mm,均显著低于5#竖垄耕地缓冲带。林地及2个降坡处理的耕地缓冲带径流量之间无显著性差异( $P>0.05$ )。从减流拦截效果来看,林地的平均减流率达到了62.4%,6#、8#横垄耕地缓冲带的减流率也分别达到了60.6%、52.0%,三者之间无显著性差异,但均显著高于5#、7#竖垄耕地缓冲带的减流率。由此可知,不同植被覆盖和处理方式的植被缓冲带均发挥了一定的降雨径流拦截效应,其中林地缓冲带和横垄耕作方式的耕地缓冲带对降雨径流的拦蓄作用最显著。

相关性分析表明,缓冲带径流量与最大30 min雨强( $I_{30}$ )之间呈显著正相关关系( $P<0.05$ )。 $I_{30}<70 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,径流深主要集中在0.03~30.7 mm范围内,当 $I_{30}$ 达到 $136.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,各缓冲带径流深在26.7~106.5 mm之间,径流量显著增大。将各坡面径流量与 $I_{30}$ 的分布绘制成散点图,并对其关系进行拟合回归分析,得到图3。回归拟合分析表明,除林地缓冲带外,裸

地、不同处理耕地坡面缓冲带的径流深均随降雨强度呈逐步升高的趋势,不同的是3#裸地、5#耕地的径流深与雨强之间呈线性变化,其他缓冲带的径流深与雨强之间呈三次函数曲线关系( $R^2>0.85$ ),降雨强度决定了耕地和裸地缓冲带85%以上的径流量,雨强是产流的主要影响因素。而两个林地缓冲带的径流深和雨强呈先增加后降低的三次函数曲线关系( $R^2>0.78$ ),在高雨强时段林地缓冲带高覆盖度的植被能够减缓降雨对地表的冲刷作用,有效改善坡面产流。

### 2.2 不同缓冲带降雨产沙分布特征

2021—2022年不同配置植被缓冲带产沙特征见表1。各缓冲带土壤流失总量从大到小依次为裸地>8°耕地>3°耕地>林地,其中裸地的总土壤流失量平均达到 $2\ 106.14 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,分别是8°耕地、3°耕地、林地缓冲带平均产沙量的2.1、4.4倍和109.2倍。通过横坡垄作方式,6#、8#缓冲带泥沙流失量分别较竖垄方式减少了342.24、139.61  $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,降幅分别为28.9%、25.2%。通过降坡处理,7#、8#两个3°耕地缓冲带泥

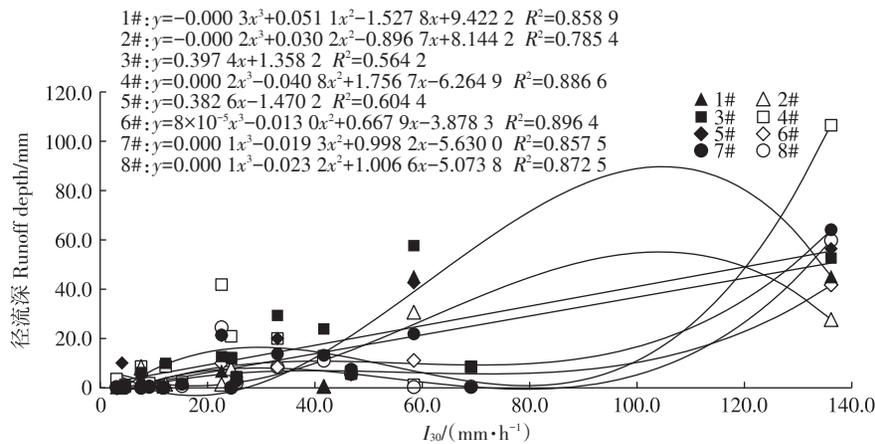


图3 缓冲带径流量与最大30 min雨强( $I_{30}$ )的散点图及其拟合曲线

Figure 3 Scatter plot and fitting curve of runoff and maximum 30 min rainfall intensity ( $I_{30}$ ) on different types of buffer strips

表1 2021—2022年不同植被缓冲带产沙特征

Table 1 Distribution characteristics of sediment yield in different buffer strips from 2021 to 2022

小区编号 District number	缓冲带类型 Buffer strip type	悬移质流失量 Suspended materials loss/ ( $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ )	推移质流失量 Bed materials loss/ ( $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ )	悬移质流失量占泥沙流失总量比例 The proportion of suspended sediment loss/%
1#	8°林地	29.85	0	100.00
2#	8°林地	8.73	0	100.00
3#	8°裸地	965.65	1 589.76	37.79
4#	8°裸地	490.69	1 166.19	29.62
5#	8°竖垄	263.30	922.55	22.20
6#	8°横垄	103.37	740.24	12.25
7#	3°竖垄	157.04	396.39	28.38
8#	3°横垄	149.43	264.39	36.11

沙流失量分别较8°耕地缓冲带减少了632.42、429.79 t·km<sup>-2</sup>,降幅分别达到53.3%、50.9%。从表1可以看出,林地缓冲带悬移质流失量占泥沙流失总量的100%,裸地和坡耕地的悬移质流失量占泥沙流失总量的比例在12.25%~37.79%之间,植被覆盖度大的林地缓冲带土壤侵蚀无推移质,坡耕地、裸地缓冲带土壤侵蚀产沙以推移质为主。

降雨事件包含降雨历时、降雨量、平均雨强、降雨动能、 $I_{30}$ 等特征因子,多数学者认为 $I_{30}$ 与土壤产流产沙关系最为密切<sup>[18]</sup>。将各缓冲带土壤流失量与 $I_{30}$ 绘制成散点图并进行拟合回归分析,结果见图4。土壤流失量主要集中在 $I_{30} \leq 70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的范围内,当 $I_{30}$ 超过120 mm·h<sup>-1</sup>时,3#~8#缓冲带土壤流失量均呈现显著增长,平均流失量达到了560.12 t·km<sup>-2</sup>。从回归分析结果来看,1#、3#缓冲带的产沙量变化与 $I_{30}$ 的线性拟合结果较差, $R^2$ 仅为0.014 6、0.529 1,其他措施处理的缓冲带产沙量变化均与 $I_{30}$ 呈现拟合较好的二次函数关系( $R^2 > 0.66$ ),土壤流失量均随雨强的增大而显著增加。

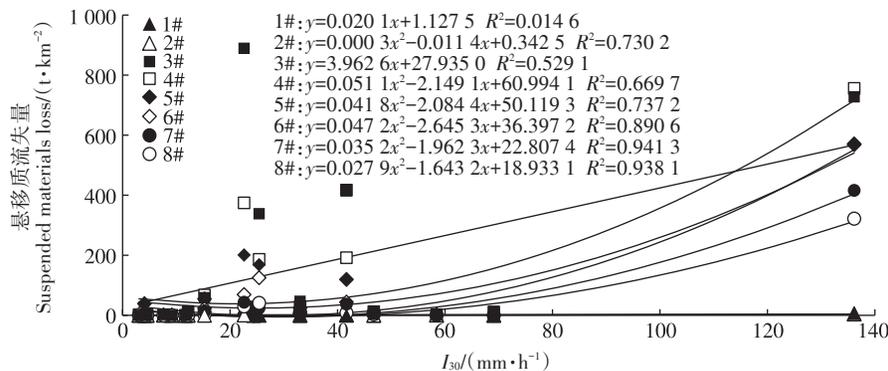


图4 不同缓冲带产沙量与最大30 min雨强( $I_{30}$ )的散点图及其拟合曲线

Figure 4 Scatter plot and fitting curve of sediment yield and maximum 30 min rainfall intensity ( $I_{30}$ ) on different types of buffer strips

表2 不同缓冲带径流主要污染物浓度(mg·L<sup>-1</sup>)

Table 2 Pollutant concentration in runoff of different buffer strips(mg·L<sup>-1</sup>)

小区编号 District number	缓冲带类型 Buffer strip type	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	TP	COD <sub>Mn</sub>
1#	8°林地	0.137±0.118b	2.000±1.068c	0.400±0.075a	3.960±0.290ab
2#	8°林地	0.221±0.118b	2.668±1.068c	0.252±0.118a	8.280±3.088a
3#	8°裸地	4.438±0.989ab	6.012±1.051bc	0.426±0.223a	3.256±0.854ab
4#	8°裸地	4.122±0.924ab	7.369±1.445abc	0.822±0.301a	5.725±1.868ab
5#	8°竖垄	6.199±1.965a	11.133±3.002ab	1.182±0.563a	6.680±2.692ab
6#	8°横垄	3.225±1.034ab	14.653±4.675a	1.028±0.387a	5.726±1.552ab
7#	3°竖垄	2.110±1.283ab	6.079±1.974bc	0.721±0.288a	2.937±0.919b
8#	3°横垄	5.993±2.144a	8.382±1.979abc	1.598±0.934a	6.452±2.574ab

注:同列不同小写字母表示小区之间差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant difference among districts ( $P < 0.05$ ).

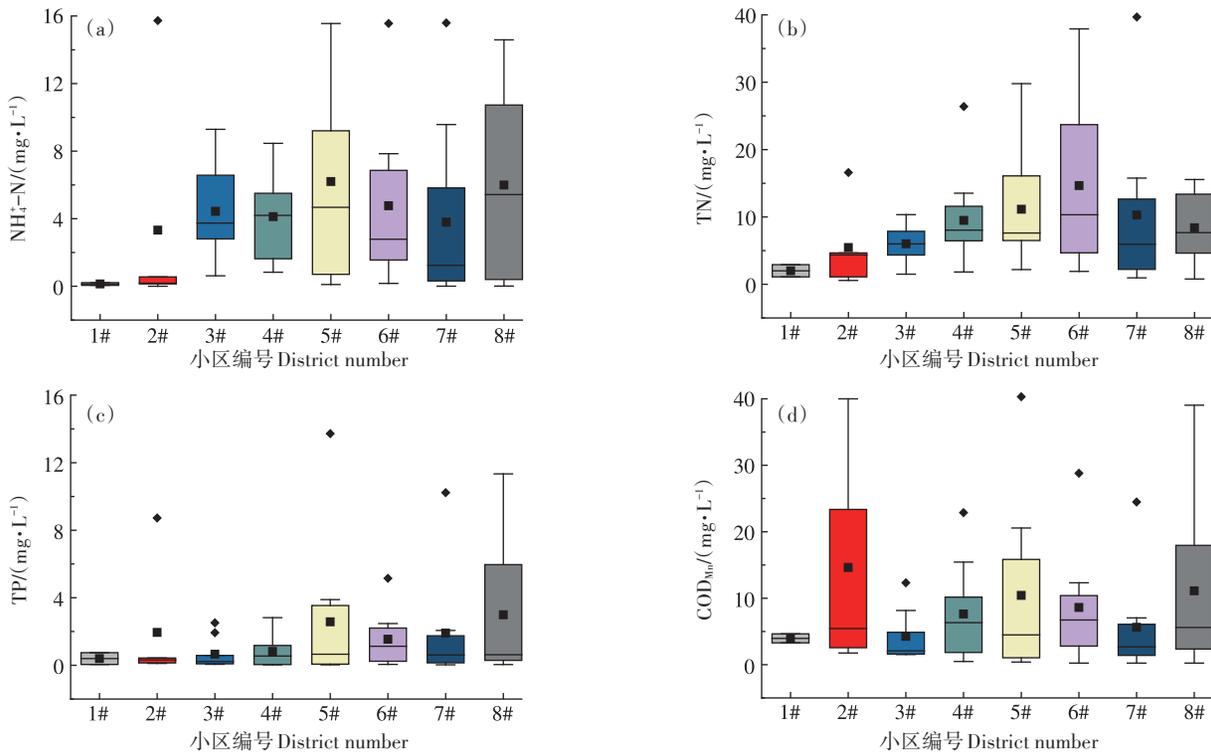


图5 不同缓冲带径流主要污染物浓度分布特征

Figure 5 Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus among plant organs

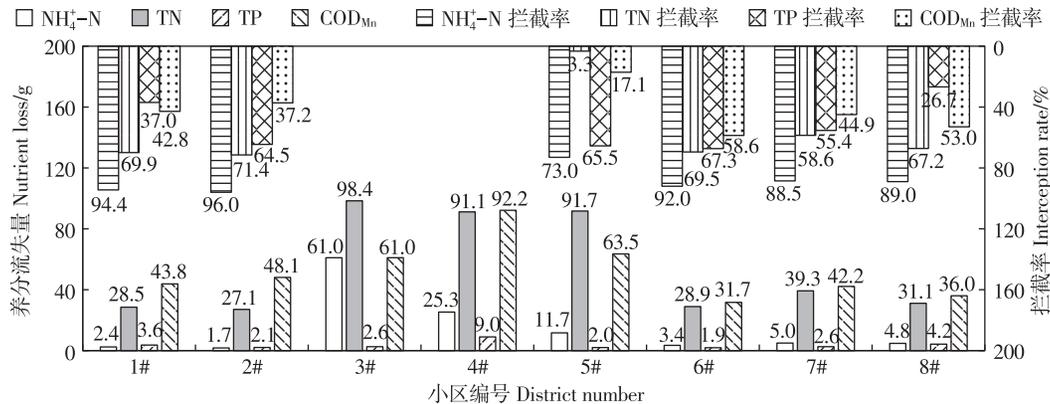


图6 不同缓冲带污染物流失量对比

Figure 6 Comparison of pollutant loss in different buffer strips

冲带出水TP浓度均低于V类水质标准;8个缓冲带产流中TP浓度之间无显著差异。出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度范围在2.937~8.280  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,2#林地缓冲带出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度显著高于7#坡耕地,可能与林地缓冲带中存在丰富的枯落物和腐殖质有关。

8个缓冲带降雨径流中污染物流失量各有差异(图6),其中TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失量大小依次为裸地>竖垄耕地>横垄耕地>林地。裸地径流中TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均流失量高达94.8、43.2 g,林地缓冲带对氮素流失的阻隔效果最好,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的拦截率平均高达95.2%,对

TN平均拦截率为70.7%。8°竖垄耕地缓冲带径流氮素流失量基本与裸地持平,TN流失量高达91.7 g。裸地径流的平均TP流失量为5.8 g,分别是林地、8°耕地缓冲带流失量的2.0、3.0倍,除8#小区外,林地的TP平均拦截率与其他处理耕地之间均无明显差异,林草措施、降坡均对径流中TP有较好的削减效果。不同处理缓冲带中 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 流失特征表现为裸地>8°竖垄>林地>3°竖垄>横垄。裸地径流平均 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 流失量达到76.6 g,林地缓冲带对径流 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的拦截率为40.0%, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均流失量仅低于8°竖垄耕作的缓冲

带,高于其他处理小区,表明利用林草地等植被措施虽然能够有效拦蓄径流有机质,但效果不如降坡和横垄处理。尽管坡度不同,但3°、8°横坡垄作方式对COD<sub>Mn</sub>的拦截率依然达到了53.0%、58.6%,说明横垄的层层拦截方式能够有效促进径流中有机质的拦蓄。

### 3 讨论

植被缓冲带尤其是林地能够依靠其土壤表层覆盖度和粗糙度有效降低坡面径流流速,增加入渗量,降低表渗流量比,进而显著减少坡面径流<sup>[19]</sup>。本研究中关于不同降雨配置缓冲带产流分布特征的观测分析结果也进一步证实了这一点。不同坡度的坡耕地减流率变化范围在26.5%~60.6%之间,同种耕作方式不同坡度的两组植被缓冲带减流率之间无显著差异,说明降坡处理对缓冲带截流作用影响不大,这与赵清贺等<sup>[20]</sup>的研究中植被对径流系数的阻控效果随坡度增加呈先增大后减小的趋势有所不同。同坡度的两个耕地缓冲带减流率均存在显著差异,横垄耕作植被缓冲带的减流率达到52%以上,与林地缓冲带无显著差异,说明通过横坡垄作的耕作方式也能起到与林地缓冲带同样的拦截径流效果。毛妍婷等<sup>[21]</sup>和杜映妮等<sup>[22]</sup>的研究证实,横坡耕作能够减少约44.6%~67.4%的降雨径流,与本研究结论较为接近。

不同处理的耕地坡面缓冲带产流量、产沙量随 $I_{30}$ 增大而增加( $R^2>0.85$ 、 $R^2>0.66$ ),说明降雨强度的变化能够决定坡耕地85%以上的产流和66%以上的产沙量。不同配置植被缓冲带的侵蚀产沙特征表现为林地缓冲带减缓土壤流失效果最佳,降坡处理的拦沙效果高于横坡垄作方式,与王敏等<sup>[23]</sup>关于低坡度缓冲带能够截留大部分固体颗粒物的研究结论一致。林地缓冲带中发达的根系和较高的覆盖度能有效促进养分吸附沉积<sup>[24]</sup>,土壤颗粒很难被雨滴打击离开地表,即使少量产沙也会被地表的枝叶、杂草拦截沉积。而受耕作和长期干旱影响,耕地地表疏松,土壤间黏结作用差,粗颗粒易被径流携带,特别是早涝急转条件下,耕地缓冲带极易产生大量推移质<sup>[25-27]</sup>。

不同植被缓冲带对径流污染的拦截作用与土壤性质、耕作方式、坡度、作物生长等关系密切。连续2年观测期间,各缓冲带降雨产流中TN和COD<sub>Mn</sub>的总流失量最高,分别达到436.1、418.5 g,TP总流失量仅为28.0 g,径流养分流失以氮素和有机质为主。氮素能够通过土壤基质吸附、覆被植物的吸收过滤、微生物固定及其引起的硝化反硝化作用等一系列过程实现

截留,且土壤颗粒表面带有负电荷,因此认为对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N有较强的吸附作用<sup>[5]</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N不易吸附在土壤颗粒表面形成固体结合态氮沉积<sup>[28]</sup>,本研究中林地缓冲带对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N流失的拦截率平均高达95.2%,对TN流失量的拦截率接近70.0%,与李晓娜等<sup>[29]</sup>、赵春红等<sup>[30]</sup>在丘陵红壤区的研究结果一致,进一步验证了上述结论。8°横垄和3°竖垄坡面缓冲带TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N流失量分别较8°竖垄减少了68.5%、70.9%和57.1%、57.2%,同时3°横垄耕作较3°竖垄的TN流失量减少20.9%,说明除林地缓冲带外,降坡和横垄耕作的处理措施也能有效减缓径流冲刷的氮素流失。

大部分溶解态磷渗透到土壤表层,经过吸附、沉淀作用最终固定在土壤中,进而被植物根系吸收或被微生物降解;而颗粒态磷是地表径流流失磷素的主要形态,其主要依靠植物茎秆进行拦截<sup>[31]</sup>。本研究结果与多数研究结论一致,不同处理植被缓冲带对径流TP均有较好的拦蓄效果,即使在大雨强下也有一定的截留作用<sup>[5,32]</sup>。此外,在入流浓度或入流流量不足的情况下,原本存在于土壤中的可溶性磷会因解析作用对削减效率产生影响。林地缓冲带的COD<sub>Mn</sub>流失量高与其表层土壤有机质含量较高有关,已有多项研究表明除溶解态和颗粒态有机质外,紫薇、海棠等林木缓冲带中的枯落物、根系分泌物及其代谢产物、小型动物排泄物等都是水体生态系统中的主要有机质来源<sup>[33-34]</sup>。横垄耕地缓冲带COD<sub>Mn</sub>流失量平均为33.8 g,分别较林地、8°竖垄、3°竖垄坡面降低26.5%、46.7%和19.9%,说明耕作方式是坡面有机质流失的主要影响因素之一,横坡拦截方式对防止有机质随径流流失效果最佳。

### 4 结论

本研究通过构建林地、裸地、8°横(竖)垄、3°横(竖)垄等8个不同类型缓冲带,开展了不同类型缓冲带对降雨径流、泥沙及养分阻控效果的长序列观测试验研究,得出以下结论:

(1)林地缓冲带的平均减流率达到62.4%,径流量随雨强增大先升高后下降。林地缓冲带和横垄耕作缓冲带对降雨径流的拦蓄作用较为显著。土壤总流失量从大到小依次为裸地>8°耕地坡面>3°耕地坡面>林地。与8°坡耕地缓冲带相比,降坡(3°)处理的竖垄、横垄耕地缓冲带泥沙流失量分别降低53.3%、50.9%。

(2)林地缓冲带降雨产流中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度最低,不

同处理的耕地缓冲带径流中氮素浓度差异不显著。不同处理缓冲带产流中的TP离散程度均高于裸地对照组,植被覆盖处理对TP浓度影响较大。

(3)坡面降雨产流的养分流失以氮素和有机质为主,林地缓冲带对氮素流失的阻控效果最好,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的拦截率平均高达95.2%,此外降坡和横垄耕作措施也能有效减缓径流冲刷的氮素流失。各植被缓冲带对径流TP均有较好的拦蓄效果,林地缓冲带能够有效去除径流中40.0%的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,但横坡垄作处理的拦截效果更优。

综上所述,在南方丘陵山地的乡村地区,结合当地农田实际和耕作条件,实施横坡垄作的耕作措施,能够在一定程度上代替林地缓冲带的截留去污功效。

#### 参考文献:

- [1] 王琼,范康飞,范志平,等.河岸缓冲带对氮污染物削减作用研究进展[J].生态学杂志,2020,39(2):665-677. WANG Q, FAN K F, FAN Z P, et al. Nitrogen pollutant removal by riparian buffer zone: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2):665-677.
- [2] XIE D S, ZHU W Y, CHEN J P, et al. Effects of five aquatic plants in south China on purification of municipal wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(8):1903-1908.
- [3] PAVLIDIS G, TSIHRINTZIS V A. Environmental benefits and control of pollution to surface water and groundwater by agroforestry systems: a review[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32:1-29.
- [4] 范洪杰,黄欠如,秦江涛,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. FAN H J, HUANG Q R, QIN J T, et al. Effects of straw mulching and vetiver hedge on runoff, soil erosion and crop yield on red soil sloping Land[J]. *Soils*, 2014, 46(3):550-554.
- [5] 汤家喜,谭婷,梁婕,等.阜新细河生态缓冲带阻控农田径流水中氮磷及除草剂的作用[J].生态学杂志,2023,42(10):2402-2409. TANG J X, TAN T, LIANG J, et al. Effects of ecological buffer strip on nitrogen, phosphorus and herbicides in runoff in Xihe River, Fuxin City [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(10):2402-2409.
- [6] 付婧,王云琦,王玉杰,等.不同入流条件下草本缓冲带对污染物削减作用[J].水土保持学报,2020,34(3):129-134. FU J, WANG Y Q, WANG Y J, et al. Effect of herbal buffer on pollutant reduction under different inflow conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3):129-134.
- [7] 张鸿龄,李天娇,赵志芳,等.辽河河岸植被缓冲带构建及其对固体颗粒物和氮阻控能力[J].生态学杂志,2020,39(7):2185-2192. ZHANG H L, LI T J, ZHAO Z F, et al. Effects of riparian vegetation buffers on the removal efficiency of suspended solids and nitrogen in Liaohe River protected area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(7):2185-2192.
- [8] MOMM H G, BINGNER R L, YUAN Y, et al. Spatial characterization of riparian buffer effects on sediment loads from watershed systems[J].

- Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(5):1736-1753.
- [9] 赵清贺,马丽娇,刘倩,等.黄河中下游典型河岸缓冲带植被景观连接度及其网络构建[J].中国生态农业学报,2017,25(7):983-992. ZHAO Q H, MA L J, LIU Q, et al. Landscape connectivity and network construction of riparian vegetation in typical reach of the middle and lower reaches of Yellow River[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(7):983-992.
- [10] MOSET V, HILLE S, RUBÆK G H, et al. Indicators of biomass and methane yields in vegetated buffer strips[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210:907-915.
- [11] 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. ZHA J J, WU Y B, MAO A M, et al. Effects of riparian plantation buffer strips on phosphorus interception in runoff water[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, 37(4):639-645.
- [12] 曹宏杰,焉志远,杨帆,等.河岸缓冲带对氮磷污染消减机理及其影响因素研究进展[J].国土与自然资源研究,2018(3):46-50. CAO H J, YAN Z Y, YANG F, et al. The review on removal mechanism of nitrogen and phosphorus pollutant and its influencing factors of riparian buffer strips[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2018(3):46-50.
- [13] MARC D, RICHARD H. 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 and Environment*, 2009, 131(1):85-97.
- [14] DUKES M D, EVANS R O, GILLIAM J W, et al. Effect of riparian buffer width and vegetation type on shallow groundwater quality in the middle coastal plain of north Carolina[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(2):327-336.
- [15] 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.
- [16] 张光君.垄沟布局对滦河上游坡耕地产流氮素流失的影响研究[D].郑州:郑州大学,2021. ZHANG G J. Study on the effect of monopoly furrow layout on nitrogen loss from the production flow of sloping cropland in the upper reaches of Luan River[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [17] 孙芳媛.不同耕作措施对坡耕地水土流失的影响[D].广州:华南农业大学,2017. SUN F Y. Effects of different cultivation measures on soil erosion of sloping farmland[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017.
- [18] 王玲莉,张富,胡彦婷,等.侵蚀性降雨分类及植被类型对产流产沙的影响[J].人民黄河,2021,43(10):109-113. WANG L L, ZHANG F, HU Y T, et al. Effects of erosive rainfall classification and vegetation types on runoff and sediment load generation[J]. *Yellow River*, 2021, 43(10):109-113.
- [19] 徐晗,鄢紫薇,胡荣桂,等.不同草本植被过滤带对径流中氮磷的生态阻控效果[J].水土保持学报,2022,36(6):140-147. XU H, YAN Z W, HU R G, et al. Ecological control effect of different herbaceous vegetative filter belts on nitrogen and phosphorus in runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):140-147.

- [20] 赵清贺, 冀晓玉, 徐珊珊, 等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13):170-178. ZHAO Q H, JI X Y, XU S S, et al. Inhibiting effect of riparian vegetation on erosion and sediment yield of slope runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13):170-178.
- [21] 毛妍婷, 刘宏斌, 郭树芳, 等. 耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5):26-33. MAO Y T, LIU H B, GUO S F, et al. Effects of tillage measures on nitrogen and phosphorus loss from surface runoff in red soil on slope farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5):26-33.
- [22] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉. 不同施肥和耕作处理紫色土坡耕地碳、氮、磷流失特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12):2149-2159. DU Y N, LI T Y, HE B H, et al. Characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of purple soil under different fertilization and cultivation methods[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(12):2149-2159.
- [23] 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. WANG M, WU J Q, HUANG S F, et al. Effects of slope and width of riparian buffer strips on runoff purification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10):4951-4956.
- [24] WANG J S, SUN J, YU Z, et al. Vegetation type controls root turnover in global grassland[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, 28(4):442-455.
- [25] 邢栋, 张展羽, 杨洁, 等. 旱涝急转条件下红壤坡地径流养分流失特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2):11-15. XING D, ZHANG Z Y, YANG J, et al. Characteristics of runoff and nutrient loss under the condition of rapid shift from drought to waterlogging in red-soil sloping land[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(2):11-15.
- [26] 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. CHEN X F, LIU T, CHENG J, et al. Effect of grass filter strips on runoff, sediment and phosphorus from vegetable field and influence factors under simulated experiment in southern China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2):377-383.
- [27] 吴鹏, 付永胜, 彭勃, 等. 植被过滤带阻控农业径流污染特性与机制进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(2):91-101. WU P, FU Y S, PENG B, et al. Advances on characteristics and mechanism of vegetative filter strips intercepting agricultural runoff pollution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(2):91-101.
- [28] 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, 261:110210.
- [29] 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. LI X N, ZHANG G F, WU M J, et al. Interception ways and effects of grass filter strips on sediment, nitrogen and phosphorus in agricultural runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3):39-44.
- [30] 赵春红, 高建恩, 徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):113-121. ZHAO C H, GAO J E, XU Z. Mechanisms of grass in slope erosion control in loess sandy soil region of northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1):113-121.
- [31] 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. LIAO M, YE Z J, HUANG Y, et al. Influence of different fertilization management modes on phosphorus loss in runoff from nursery land in the catchment area of Hexi Reservoir in Changxing County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21):7342-7350.
- [32] ZAK D H, KRONVANG B, CARSTENSEN M V, et al. Nitrogen and phosphorus removal from agricultural runoff in integrated buffer zones[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(11):6508-6517.
- [33] 王超, 尹炜, 贾海燕, 等. 滨岸带对河流生态系统的影响机制研究进展[J]. 生态科学, 2018, 37(3):222-232. WANG C, YIN W, JIA H Y, et al. Review on the influence mechanism of riparian zone to the river ecosystem[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(3):222-232.
- [34] PAETZOLD A, SCHUBERT C J, TOCKNER K. Aquatic terrestrial linkages along a braided-river: riparian arthropods feeding on aquatic insects[J]. *Ecosystems*, 2005, 8(7):748-759.