

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2018.0019

刘惠勤,陈敬宣,李洁,等.河北山地落叶松林河岸缓冲带去污效果试验研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):138-143.
LIU H Q, CHEN J X, LI J, et al. The water purification effect of larch forest riparian buffer zone in mountainous area of Hebei [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 138-143. (in Chinese)

河北山地落叶松林河岸缓冲带去污效果试验研究

刘惠勤¹, 陈敬宣², 李洁³, 李宏伟⁴, 王雄宾³

- (1. 河北省水土保持工作站, 石家庄 050011; 2. 石家庄滹沱河生态区管理处, 石家庄 050011;
3. 河北省水利科学研究院/河北省农业节水工程技术研究中心, 石家庄 050051;
4. 河北省水利物资供应站(河北省防汛抗旱物资储备调运中心), 石家庄 050021)

摘要: 选用3种浓度铵态氮和总磷溶液, 分别以0.67、1.82 L/s两种流量对河北省围场县落叶松林河岸缓冲带进行灌水试验, 分析河岸缓冲带对不同浓度、不同流量地表径流中铵态氮、总磷的削减效果。结果表明, 随缓冲距离增加, 河岸缓冲带对地表径流铵态氮和总磷削减效果呈增强趋势。在相同缓冲距离处, 较小地表径流量下对铵态氮和总磷削减率普遍大于较大流量下的削减率。随着缓冲距离增大, 较小径流量下铵态氮削减率和较大流量下铵态氮削减率的差值表现出先增大后减小的趋势。经20 m的落叶松林河岸缓冲带后, 地表径流量对各污染条件下铵态氮和总磷削减率的影响逐渐变小。在两种径流量下, 落叶松河岸缓冲带对铵态氮和总磷的削减率都呈现出重度污染削减率>中度污染削减率>轻度污染削减率的规律。

关键词: 河岸缓冲带; 氮磷污染; 地表径流量; 削减效果

中图分类号: X522 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The water purification effect of larch forest riparian buffer zone in mountainous area of Hebei

LIU Huiqin¹, CHEN Jingxuan², LI Jie³, LI Hongwei⁴, WANG Xiongbin³

- (1. General Station of Soil and Water Conservation of Hebei Province, Shijiazhuang 050011, China;
2. Administrative Office of Hutuo River Ecozone of Shijiazhuang, Shijiazhuang 050011, China; 3. Water Resources Institute of Hebei/ Engineering Research Center for Water Saving in Agriculture of Hebei, Shijiazhuang 050051, China; 4. Water Resources Materials Supply Station of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: To fully understand the reduction effects of larch forest riparian buffer zones on surface runoff pollutants, we used ammonium nitrogen and total phosphorus solutions of three concentrations to irrigate the larch forest riparian buffer zone in Weichang County of Hebei Province at flow rates of 0.67 L/s and 1.82 L/s. The results showed that, the reduction effect of riparian buffer zone on the ammonium nitrogen and total phosphorus in surface runoff would be enhanced with the increase of buffer length. At the same buffer distance in the riparian buffer zone, the reduction rates of ammonium nitrogen and total phosphorus in the smaller surface runoff were both better than those in the larger runoff. With the increase of buffer distance, the difference of the reduction rate of ammonium nitrogen between smaller runoff and larger runoff showed a trend of increasing first and then decreasing. When the polluted water flowed through 20 m larch forest riparian buffer zone, the influence of surface runoff on the reduction rates of ammonium nitrogen and total phosphorus became smaller in all the pollution conditions. At both

收稿日期: 2018-10-14 修回日期: 2018-11-07 网络出版时间: 2018-11-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181109.1704.002.html>

基金项目: 河北省科技计划项目(16223607D); 河北省水利科技计划项目(2018-10)

作者简介: 刘惠勤(1976—), 女, 河北武强人, 高级工程师, 主要从事水土保持方面研究。E-mail: 445601765@qq.com

通信作者: 王雄宾(1980—), 男, 河北藁城人, 高级工程师, 博士, 主要从事水土保持, 生态修复方面研究。E-mail: wangxiongbin1980@126.com

runoff volumes, the reduction rates of ammonium nitrogen and total phosphorus in the larch riparian buffer zone showed the laws of heavy pollution reduction rate > moderate pollution reduction rate > light pollution reduction rate.

Key words: riparian buffer zones; nitrogen and phosphorus pollution; surface runoff; reduction effect

河岸缓冲带是由土壤、植物、微生物等组合而成的复合生态系统,可有效控制入河污染物含量^[1]。农业面源污水在流经河岸缓冲带时,河岸缓冲带通过过滤、吸收、滞留、沉积等作用,使地表径流和壤中流的污染程度降低^[1-2]。国外对河岸缓冲带研究较早,主要集中在不同地域、不同立地类型以及缓冲带宽度等对氮、磷等污染物的去除效果^[3-6]。国内对河岸缓冲带研究起步较晚,在不同地域的植被类型^[6-9]、宽度^[10,11]、坡度^[12-14]、土壤性质^[15-16]、枯落物^[17,18]等因素对河岸缓冲带削减氮、磷污染物效果方面进行了研究,而对河岸缓冲带净水效果与污水流量及水体污染程度相关性的研究方面较少。

河北北部山区坡耕地较多,坡度一般小于 15°,坡耕地多种植蔬菜和粮食作物,雨后坡耕地含有大量氮、磷等营养元素的坡面径流有时候会直排进河流,使河流污染加重。坡耕地的坡度、集水面积等因素会影响坡耕地下游地表径流量,农业不同的施肥习惯等会影响地表径流中的污染物含量。华北落叶松林护岸护坡能力较强,是北方山区常用的水土保持植物,华北落叶松林丰富的凋落物和林下植被可以减缓地表径流流速,促进植被、土壤等对面源污染物的交换与吸收,其根系主要分布在 0~40 cm 土层,对面源污染物 N、P 有较强的吸收能力。本研究在河北省承德市围场县滦河上游流域选择典型华北落叶松林河岸缓冲带,通过人工模拟地表径流试验,比较分析河岸缓冲带对不同流量及不同污染物浓度地表径流中铵态氮和总磷的削减效果,以期为当地河岸缓冲带建设提供科学依据。

1 研究区概况

研究地位于河北省承德市围场县,该区域是阴山山脉、大兴安岭余脉向西南延伸与燕山余脉的结合部,年降水量为 350~500 mm,多在 6—8 月,暴雨较为集中。地带性土壤为褐土,并有棕壤、山地草甸土及浅色草甸土等分布。围场县主要森林类型有人工华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林、人工油松(*Pinus tabulaeformis*)林、天然油松林、人工樟子松林(*Pinus sylvestris*)和以山杨(*Pobulus davidiana*)和白桦(*Betula platyphylla*)为主要树种的天然阔叶林。选取位于围场县石桌子乡

(41°48'N, 117°11'46"E)滦河支流蚂蚁吐河沿岸人工华北落叶松林较平缓坡面为研究区。

2 研究方法

(1) 样地布置

2017 年夏季,根据坡面径流方向,靠近河岸选取长 20 m、宽 4 m 的落叶松林设为样地(距离水体 2~22 m),样地上游为长 50 m、宽 23 m(水流方向)坡耕地,坡耕地内种植玉米,坡耕地上游坡面上为落叶松林。样地坡度约 9°,林龄约 40 a,密度约为 80 株/hm²,林分郁闭度 0.7,落叶松胸径平均 22 cm,林下灌木以毛榛为主,间有少量胡枝子、大叶小檗,灌木盖度 0.3。样地林下枯落物以落叶松松针为主,厚度 0.5~2 cm,土质为中壤土,pH 值 6.5,腐殖质含量 3%。根据初步观测,降雨量为 15.5 mm/h¹时,此样地下部产生地表径流约为 0.8 L/s;降雨量为 25.3 mm/h 时,下部产生地表径流约为 1.8 L/s。

在宽 0、1.3、2.6、3.9 m 处对样地进行围挡,分成 3 块宽约 1.0 m,长 20 m 的长条形小样地,3 块小样地相邻且相互独立。自高至低在每块样地的 1、2、4、6、8、10、15、20 m 断面处安置试管,试管口低于地面 0.5 cm。

(2) 样品采集

试验于 2018 年 7、8 月进行,每次试验开始前将各样地土壤用河水充分浸泡,然后用水泵抽取河水送至样地上方的水桶中,将适量磷酸二氢钾和尿素混合施于水中,分别形成 3 个接近国家水环境质量标准污染程度的污水(见表 1),从样地起始端分别将 3 种污水样缓慢放到样地中,模拟携带农业面源污染物的地表径流,待地表径流稳定以后,取回各试管中的样本,编号后带回实验室化验。7 月试验放水的平均水流量较大,为 1.82 L/s,8 月试验放水的平均水流量较小,为 0.67 L/s,分别用于模拟该坡面降雨量约为 15 mm/h(大雨)和 25 mm/h(暴雨)时小样地的流量。

表 1 不同处理水样中污染物浓度

Tab. 1 Contaminant concentrations in water samples of different treatments 单位:mg/L

污染物	轻度污染	中度污染	重度污染
铵态氮	2.8	5.6	10.0
总磷	0.4	0.7	1.5

(3) 测定指标及方法

本研究测定指标为铵态氮和全磷,采用默克 NOVA60A 多参数水质分析仪对其浓度进行测定。

(4) 化肥的选择

试验用于地表径流的污水为地下水和化肥混合溶液,化肥选择当地农民施肥时习惯撒施的尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)和磷酸二氢钾(KH_2PO_4)。

3 结果与分析

3.1 落叶松河岸缓冲带对不同污染程度地表径流中铵态氮的削减效果分析

随着缓冲距离的增大,河岸缓冲带对各污染程度地表径流铵态氮的削减率呈现出逐渐增大的趋势(图 1)。在水流量为 0.67 L/s 条件下(图 1(a)),重度污染径流在 6 m 处对铵态氮削减率达到 64.33%,此后削减率达到相对稳定状态,随缓冲距离增加削减率变化不大,20 m 处削减率为 77.95%;中度污染径流在 10 m 处对铵态氮削减率达为 65.07%,和 20 m 处削减率 72.63%较为接近;轻度污染径流在 10 m 处对铵态氮削减率为

58.18%,达到 20 m 处削减率(70.01%)的 83%。铵态氮削减率达到相对稳定状态时,重度污染条件下需要的缓冲距离比中度和轻度污染条件下的缓冲距离短。在水流量为 1.82 L/s 条件下(图 1(b)),重度、中度和轻度污染地表径流在 20 m 处削减率分别为 69.10%、56.89%和 52.76%,其中 10 m 处削减率分别为 20 m 处削减率的 52.52%、46.19%和 44.57%,在各监测的缓冲距离处,重度污染削减率一般最大,其次为中度污染削减率,轻度污染削减率最小,且各浓度污染物径流的削减率都未达到相对稳定状态。

河岸缓冲带对各污染程度地表径流中铵态氮的削减效果规律性明显,随着缓冲距离的增大,河岸缓冲带对各污染程度地表径流的铵态氮削减率呈现出逐渐增大的趋势。落叶松林河岸缓冲带对地表径流中铵态氮消减作用较强,且呈现出重度污染削减率>中度污染削减率>轻度污染削减率的规律。污水流量较小情况下,铵态氮削减率达到相对稳定状态时,重度污染条件下需要的缓冲距离比中度和轻度污染条件下的缓冲距离短。

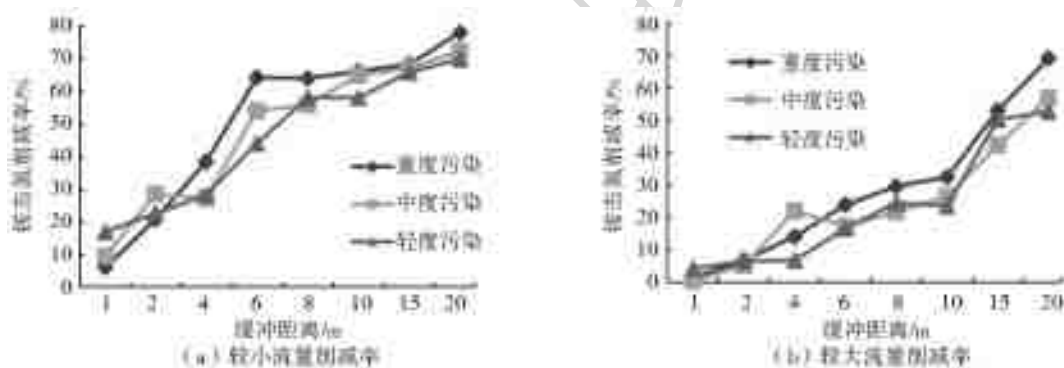


图 1 落叶松河岸缓冲带对不同污染程度地表径流铵态氮的削减效果

Fig. 1 Removal efficiency of ammonium nitrogen in surface runoff with different degrees of pollution by larch riparian buffer zones

3.2 落叶松河岸缓冲带对不同流量地表径流中铵态氮削减效果分析

落叶松河岸缓冲带对不同流量地表径流中铵态氮削减效果见图 2,由图 2 可知,在相同缓冲距离处,较小地表径流量的铵态氮削减率都大于较大流量的铵态氮削减率,重度污染、中度污染和轻度污染条件下,20 m 处较小流量铵态氮削减率分别为较大流量铵态氮削减率的 1.13、1.28 和 1.33 倍。缓冲距离较小时,河岸缓冲带对铵态氮的消减率都较小,且两种流量下的消减率差值也较小;随着缓冲距离的增加,不同流量下的消减率都呈现逐渐增大趋势,且两者差值也呈现出逐渐增大趋势;超过一定缓冲距离后,流量对铵态氮削减率的影响又逐渐缩小。重度污染条件下(图 2(a)),在缓冲距离 6 m 处较大

流量铵态氮削减率和较小流量削减率的差值最大(40.46%)。中度污染(图 2(b))和轻度污染(图 2(c))在缓冲距离为 10 m 时达到最大;

综上,在河岸缓冲带相同缓冲距离处,较小地表径流流量的铵态氮削减率都大于较大流量的铵态氮削减率。在相同缓冲距离处,较小流量铵态氮削减率和较大流量铵态氮削减率的差值表现出先增大后减小的趋势。

3.3 落叶松河岸缓冲带对不同污染程度地表径流中总磷的削减效果分析

落叶松林河岸缓冲带对地表径流中总磷消减作用较强,随着缓冲距离的增大,河岸缓冲带对各污染程度地表径流总磷的削减率呈现出逐渐增大的趋势(图 3)。在水流量为 0.67 L/s 条件下(图 3(a)),重

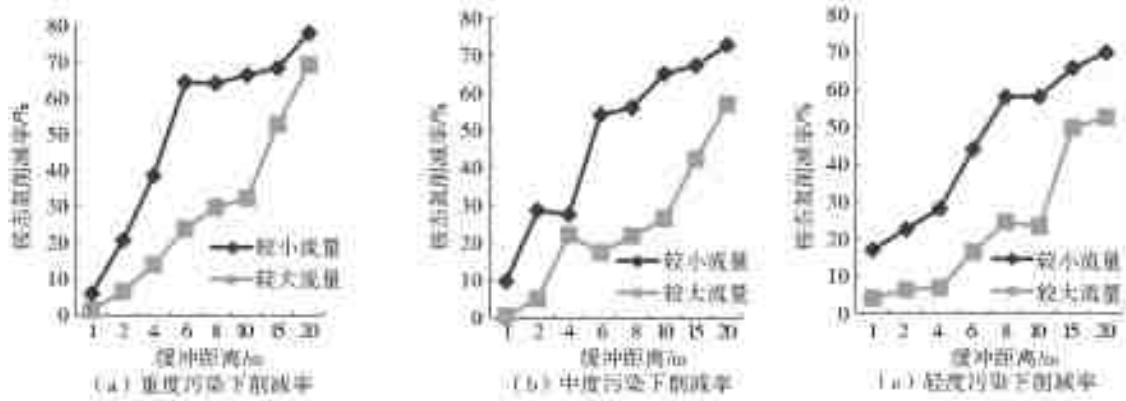


图2 河岸缓冲带对不同流量污染地表径流铵态氮的削减效果

Fig. 2 Removal efficiency of ammonium nitrogen in surface runoff of different flow rates by larch riparian buffer zones

度污染径流在 2 m 处总磷削减率达到 39.46%，此后随缓冲距离增加削减率逐渐增大，10 m 处削减率变为 53.54%，20 m 处变为 79.98%；中度污染径流在 4 m 处消减率达到 37.79%，6 m 处稍有下降变为 34.37%，此后逐渐增大，10 m 处削减率变为 52.80%，20 m 处变为 63.32%。在水流量为 1.82 L/s 条件下(图 3(b))，重度污染径流在 2 m 处总磷削减率达到 34.29%，此后随距离增加削减率呈增大趋势，10 m 处削减率变为 52.00%，20 m 处变为

74.29%；中度污染径流在 2 m 处消减率达到 22.04%，10 m 处稍有所下降变为 33.31%，此后逐渐增大，10 处削减率变为 52.80%，20 m 处变为 57.96%。

综上所述，随着缓冲距离的增大，河岸缓冲带对各污染程度地表径流的总磷削减率呈现出逐渐增大的趋势。在大部分缓冲距离点位，落叶松河岸缓冲带对总磷的削减率呈现出重度污染削减率>中度污染削减率>轻度污染削减率的规律。

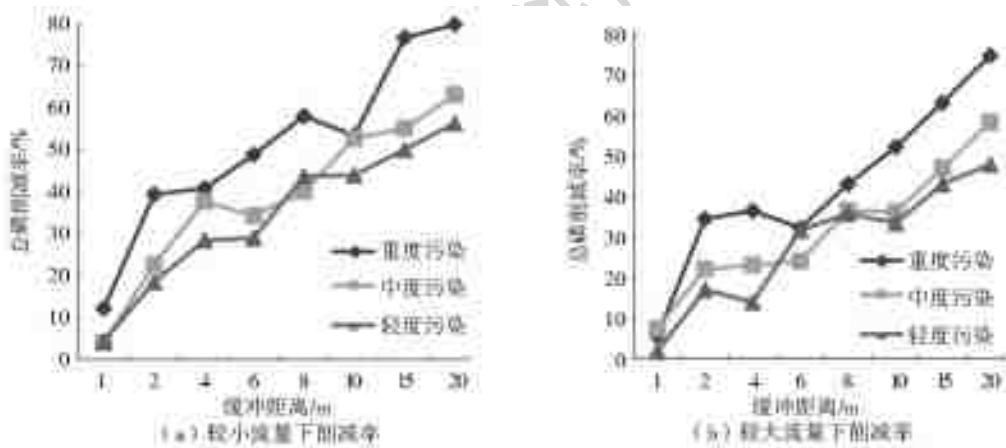


图3 落叶松河岸缓冲带对不同程度污染地表径流总磷的削减效果

Fig. 3 Removal efficiency of total phosphorus in surface runoff with different degrees of pollution by larch riparian buffer zones

3.4 落叶松河岸缓冲带对不同流量地表径流总磷削减效果分析

落叶松河岸缓冲带对不同流量地表径流中总磷的削减效果见图 4，由图 4 可知，较小流量径流的总磷削减率普遍大于较大流量径流的总磷削减率，且两者相差不大。重度污染条件下(图 4(a))，10、15 和 20 m 处较小径流总磷削减率分别为较大径流总磷削减率的 1.03、1.22 和 1.07 倍；中度污染条件下(图 4(b))，10、15 和 20 m 处较小径流总磷削减率分别为较大径流总磷削减率的 1.46、1.18 和 1.09 倍；轻度污染条件下(图 4(c))，10、15 和 20 m 处较小径流总磷削减率分别为较大径流总磷削减率的

1.33、1.17 和 1.18 倍，经 20 m 的落叶松林河岸缓冲带后，流量对各污染条件下总磷削减率的影响逐渐变小。

综上所述，较小流量径流总磷的削减率普遍大于较大流量径流总磷的削减率，且随着缓冲距离的增大，较大流量径流总磷削减率和较小流量径流总磷削减率表现出相似的变化规律(图 4)。

4 结论

河岸缓冲带主要通过颗粒态沉积、土壤吸附、植物的根吸附及微生物固定吸收等作用来实现对水中氮、磷污染物的截流转化。本试验过程中，由于停留

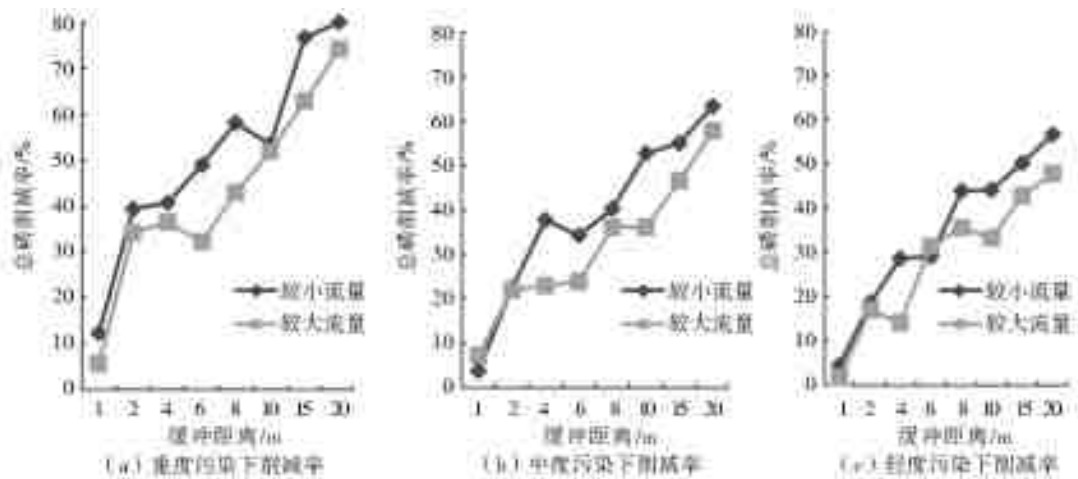


图 4 河岸缓冲带对不同流量污染地表径流铵态氮的削减效果

Fig. 4 Removal efficiency of total phosphorus in surface runoff of different flow rates in larch riparian buffer zones

时间较短,河岸缓冲带对铵态氮、总磷的吸收主要是缓冲带土壤对污染物的吸附作用,植物吸收及生物脱氮作用较小。

(1)当河岸缓冲带地表径流发生时,较小流量径流中污染物离子与土壤接触机会较多,被土壤吸附机会较大。在相同缓冲距离处,较小地表径流流量的铵态氮和总磷削减率都大于较大流量下的削减率。本试验结果表明,随着缓冲距离增大,较小流量下铵态氮削减率和较大流量下铵态氮削减率的差值表现出先增大后减小的趋势。

(2)地表径流中污染物浓度越高,水流中污染物与土壤接触机会越大,被土壤吸附机会也更多。在两种径流量下,落叶松河岸缓冲带对铵态氮和总磷的削减率基本呈现出重度污染削减率>中度污染削减率>轻度污染削减率的规律,同阎丽凤等^[8]研究结果相同。

(3)落叶松林河岸植被缓冲带对各污染程度地表径流中铵态氮和总磷的削减效果明显,随着缓冲距离的增大,河岸缓冲带对各污染物的削减率呈现出逐渐增大的趋势。经过 20 m 的河岸缓冲带后,较大流量下对铵态氮重度污染削减率、中度污染削减率、轻度污染削减率分别为 69.10% 52.76% 和 56.89%,较小流量下对铵态氮重度污染削减率、中度污染削减率、轻度污染削减率分别为 77.95%、72.63%、70.01%;较大流量下对全磷重度污染削减率、中度污染削减率、轻度污染削减率分别为 74.29% 57.96% 和 47.77%,较小流量下对全磷重度污染削减率、中度污染削减率、轻度污染削减率分别为 79.98%、63.32%、56.55%。

(4)坡度^[15]、微地形^[14,16]、植被类型^[17]、枯落物^[18]、降雨量等因素都会影响坡面径流的流量,进而影响土壤、枯落物等对地表径流污染物的吸附,这

决定了不同流量下河岸缓冲带改善水质能力的特性。在河岸缓冲带建设过程中,可以通过减小坡度、增加林下草本植被及枯落物、增加改变河岸缓冲带粗糙程度的微地形等措施降低地表径流水流速度,提高河岸缓冲带对污染地表径流中铵态氮和总磷的吸收。对于铵态氮、总磷污染程度较重的地表径流,可以通过增加河岸缓冲带长度和降低地表径流流速等方法,减少流入河流的污染量。

受各方面所限,本研究只考虑了流量和污染程度对地表径流中污染物吸收,并未考虑壤中流污染物变化及壤中流与地表径流交互作用。

参考文献(References):

- [1] TANG Q, BAO Y, HE X, et al. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2014(479-480): 258-266.
- [2] 赵清贺, 刘倩, 马丽娇, 等. 黄河中下游典型河岸缓冲带植被格局时空动态[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2127-2137. (ZHAO Q H, LIU Q, MA L J, et al. Spatial-temporal dynamics of vegetation pattern in a typical riparian buffer zone of the middle and lower reaches of Yellow River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(8): 2127-2137. (in Chinese))
- [3] MESSER T L, BURCHELL M R, GRABOW G L, et al. Groundwater nitrate reductions within upstream and downstream sections of a riparian buffer[J]. Ecological Engineering, 2012, 47: 297-307.
- [4] CLINTON B D. Stream water responses to timber harvest: Riparian buffer width effectiveness[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261: 979-988.
- [5] FORTIER J, GAGNON D, TRUAX B, et al. Biomass and volume yield after 6 years in multiclinal hybrid poplar riparian buffer strips[J]. Biomass and Bioener-

- gy, 2010, 34: 1028-1040.
- [6] 李萍萍, 崔波, 付为国, 等. 河岸带不同植被类型及宽度对污染物去除效果的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, 37(6): 47-52. (LI P P, CUI B, FU W G, et al. Effects of riparian buffer vegetation types and width on pollutant removal[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2013, 37(6): 47-52. (in Chinese))
- [7] 张广分. 潮白河上游河岸植被缓冲带对氮、磷去除效果研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(8): 189-194. (ZHANG G F. The effects of riparian vegetation buffer zones on nitrogen and phosphorus reduction in Chaobai river upstream[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 29(8): 189-194. (in Chinese))
- [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. (YAN L F, SHI X F, YU L Z, et al. Elimination effects of riparian vegetation buffer zones on surface water nitrogen and phosphorus in Shenyang suburbs[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 403-408. (in Chinese))
- [9] 田素平, 张宽义, 王雄宾. 冀北山地河岸缓冲带净水效果研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(17): 263-264, 284. (TIAN S P, ZHANG K Y, WANG X B. The water purification effect of riparian buffer zone in mountainous area of north Hebei[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2015, 43(17): 263-264, 284. (in Chinese))
- [10] 陈航, 杨栋, 华玉妹, 等. 河岸草本缓冲带对模拟径流中污染物的净化[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 1-5. (CHEN Hang, YANG Dong, HUA Yu-mei, et al. Purifying ability of riparian pasture buffer strips for pollutants[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(5): 1-5. (in Chinese))
- [11] 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. (SUN J W, XU W S. Research advances in ecological functions and filtration mechanism of riparian buffer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 40-44. (in Chinese))
- [12] 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. Optimizing vegetation pattern for the riparian buffer zone along the lower Yellow River based on slope hydrological connectivity[J]. Acta ecologica sinica, 2008, 28(10): 4951-4956. (in Chinese))
- [13] 吴建强. 不同坡度缓冲带滞缓径流及污染物去除量化[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 112-117. (WU J Q. Quantitative study of the damping effect of buffer strips with different slopes on runoff and pollutant removal efficiency[J]. Advances in water science, 2011, 22(1): 112-117. (in Chinese))
- [14] MUOZ-ROBLES C, TIGHE M, REID N, et al. A two-step up-scaling method for mapping runoff and sediment production from pasture and woody encroachment on semi-arid hillslopes. Ecohydrology, 2013(6): 83-93.
- [15] 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. (WU Y B. Research progress on the riparian vegetation buffer strip functions on agricultural non-point source pollution reduction[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2015, 39(3): 143-148. (in Chinese))
- [16] 周思思, 王冬梅. 河岸缓冲带净污机制及其效果影响因素研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 114-120. (ZHOU S S, WANG D M. The review on purification mechanism and its influencing factors of riparian buffers[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(5): 114-120. (in Chinese))
- [17] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 基于坡面水文连通性的黄河下游河岸缓冲带植被格局优化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 739-747. (CAO Z H, ZHAO Q H, ZUO X Y, et al. Optimizing vegetation pattern for the riparian buffer zone along the lower Yellow River based on slope hydrological connectivity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 739-747. (in Chinese))
- [18] 汤家喜, 何苗苗, 王道涵, 等. 河岸缓冲带对地表径流及悬浮颗粒物的阻控效应[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2747-2755. (TANG J X, HE M M, WANG D H, et al. Suspended sediments and runoff reduction by established riparian vegetated filter strips[J]. Chinese Journal of environmental engineering, 2016, 10(5): 2747-2755. (in Chinese))