

不同植物配置模式坡耕地面源污染生态阻控特征

王磊, 索琳娜, 魏丹, 丁建莉, 郑云霞, 苏刘燕, 安志装

(北京市农林科学院 植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要:利用 8 个差异化植被配置野外规模化径流小区的构建,探索自然降水环境下差异化植被配置给面源污染所形成的制约作用,其中主要参考 5 个指标,一是总氮(TN),二是总磷(TP),三是化学需氧量(COD),四是生物需氧量(BOD₅),五是总有机碳(TOC),从而可为库区水土流失的治理防控供给一定借鉴作用。结果表明:(1)植物对于面源污染有着显著的控制效果,天然降雨条件下,减流作用最好的是板栗(*Castanea mollissima*) + 苦参(*Sophora flavescens*)小区,平均减流作用为 70.58%,板栗 + 雀麦(*Bromus japonicus*)最差,但相比板栗单种仍减流 56%。(2)苦参、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、薄荷(*Mentha haplocalyx*)、野牛草(*Buchloe dactyloides*)和板栗的间作模式能有效地降低坡耕地的磷素流失,丹参(*Salvia miltiorrhiza*)和板栗间作模型可在一定程度上降低坡耕地的氮素流失。除雀麦和板栗间作小区外,其他间作模式小区,分别比对照小区径流水中的 COD, BOD₅, TOC 消减率为 29.10%~95.04%, 31.49%~93.60%和 16.76%~62.17%。(3)间作板栗 + 苦参对 TN, TP 等相关参数具有最优改善效果,可实现最佳配置效果,经过整体性评估从而得出,其具备最大推广价值。研究结果可为坡耕地生态阻控植物配置技术提供一定数据参考。

关键词:径流; 植被配置; 面源污染; 水土流失

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0029-06

Ecological Control Characteristics of Non-point Source Pollution in Slope Farmland Under Different Plant Allocation Modes

WANG Lei, SUO Linna, WEI Dan, DING Jianli, ZHENG Yunxia, SU Liuyan, AN Zhizhuang

(Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Miyun reservoir is not only the main surface drinking water source, but also the ecological conservation area in Beijing. With the rise of water level and the construction of soil and water conservation project in Miyun reservoir, a series of changes have taken place in its ecological environment. In order to provide a certain reference for the control and prevention of soil erosion in this area, differential vegetation coverage can restrict non-point source pollution. Five indicators such as total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD₅), and total organic carbon (TOC) under natural rainfall conditions were studied by constructing 8 field standard runoff plots with different vegetation configurations. The results show that: (1) under natural rainfall conditions, the best runoff reduction effect was exerted by *Castanea mollissima* + *Sophora flavescens* plot, the average runoff reduction was 70.58%, the worst effect was exerted by *Castanea mollissima* + *Bromus japonicus*, but *Castanea mollissima* + *Bromus japonicus* still reduced the runoff by 56% compared with the single *Castanea mollissima* species; (2) the intercropping model of *Sophora flavescens*, *Medicago sativa*, *Mentha haplocalyx*, *Buchloe dactyloides* and *Castanea mollissima* could effectively reduce the loss of phosphorus in slope farmland, and the intercropping model of *Bromus japonicus* and *Castanea mollissima* could reduce the nitrogen loss of slope farmland to a certain extent; in addition to *Bromus japonicus* and *Castanea mollissima* intercropping plots, the reduction rates of COD, BOD₅ and TOC in runoff of other intercropping plots were 29.10%~95.04%,

收稿日期:2020-10-26

修回日期:2020-11-13

资助项目:多源有机垃圾折叠式快速降解移动化技术、装备研发(2019YFD1100304-03),农林复合体系模式研究与示范项目(KJ CX20200601),北京市农林科学院植物营养与资源研究所科技能力提升课题“密云水库水源保护区面源污染生态防控模式优化与应用”(YZS201910);联合国开发计划署项目(The UNDP Project)密云水库面源污染生态控制与环境可持续发展研究(cpr/19/401)

第一作者:王磊(1993—),男,甘肃庆阳人,研究实习员,硕士,主要从事农业面源污染治理研究。E-mail:314429112@qq.com

通信作者:安志装(1969—),男,河南商丘人,研究员,博士,主要从事农业面源污染治理研究。E-mail:azzly@126.com

31.49%~93.60% and 16.76%~62.17%, respectively; (3) intercropping *Castanea mollissima* and *Sophora flavescens* had the best effect on reducing TN, TP and other non-point source pollution indicators, and its allocation effect was the best. Comprehensive evaluation was the most suitable for large-scale promotion.

Keywords: runoff; vegetation allocation; non-point pollution; soil and wate loss

伴随农业生产过程中农药、化肥的广泛应用,造成其面源污染日益加剧,从而导致一系列危害性问题,例如水体水华现象、农产品质量不达标等,给人们的身体健康形成了严重的危害。当前得到广泛认可的生物防治方法之一是构建植物篱。该方法不但能够降低水流以及土壤养分的流失速度,而且还能够使水稳性土壤团粒构造得到改善^[1],尤其是应用在陡坡地当中,其成效更为显著^[2]。Zhao 等研究不同植物在降水强度存在差异化,土壤水分含量以及坡度差异化条件下的径流特点,从而得出,植被能够使产流时间得到延长,使径流系数得到缩减^[3]。黄欠如等研究发现由香根草(*Vetiveria zizanioides*)植被所构成的植物篱在我国南部区域应用较多,尤其是在红壤陡坡地区,其对径流以及泥沙的阻拦率依次为 29%~72%,56.25%~97.4%^[4-5]。Donjadee 等也对此展开了相关探讨,从而得出,当土地坡度超过 30%时,该植物篱所发挥出的径流阻拦率能够达到 31%~69%,泥沙阻拦率能够达到 62%~86%^[6]。李凯等也对此展开相关探索,重点区域分析了密云水库岸滨地区,从而得出在自然降水环境下,由柳树(*Salix matsudana*) + 丁香(*Syzygium aromaticum*) + 蒿(*Artemisia*)组成的植被结构可发挥最佳的减流效果,能够降低 62.9%,其中减沙效果最佳植被组合是毛白杨(*Populus tomentosa*) + 紫丁香(*Syringa oblata*) + 葎草(*Humulus scandens*),可减沙 78.18%,另外,在面源污染防治方面成效最为显著的植被组合为油松(*Pinus tabulaeformis*) + 金叶榆(*Ulmus pumila*)小区^[7]。如今,全球各国关于面源污染所进行的探索多数都是基于降水模拟或径流冲刷的方式而实施的,未在实地进行验证,在推广应用方面存在较多的问题,因此开展天然降雨条件下植物配置模式防控面源污染对于坡耕地氮磷流失生态阻控具有很大的实践意义。

密云水库坐落在北京地区,是该地最重要的地表饮用水来源,也是北京市生态涵养区,保证密云水库水质安全关乎北京市经济绿色可持续发展和首都的社会安全稳定。该地区最大的面源污染源头就是水源保护区陡坡地,要从根本上解决农业面源污染问题,要注重农业面源污染的“源头控制”与“过程阻断”,技术层面上要从优化生产技术着手。利用植物篱的建立与应用,来

降低与防控面源污染给当地水质造成的污染,同时这也是进行面源与水体污染治理与防控的良好手段与途径,所以探讨差异化植被配置给面源污染防控所产生的影响,从而构建最佳植被配置的植被缓冲带,从而为确保该水库水质发挥关键作用。为实现植被配置效果的最佳化,该文利用 8 个差异化植被配置野外规模化径流小区的构建,探索自然降水环境下差异化植被配置给面源污染所形成的制约作用,研究各种植被配置所产生的面源防控作用,从而为陡坡地区生态保护及防控植物配置方面发挥借鉴作用。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于密云县一级水源保护区太师屯镇太师庄村西南部(117°6′42.08″E,40°32′22.02″N),其北边分布着潮河,该河是最关键的进库河,南部为清水河,地处暖温带,气候类型是大陆季风气候,其特点为半湿润半干旱,其年均气温约为 13.5℃。气温最大均值出现在 7 月份,其数值为 26.7℃,最大值为 40℃;气温最小均值出现在 1 月份,其数值为 -1.7℃,最小值为 -20℃。海拔 155 m。土壤以均质壤型为主,面积比例高占 89.8%,土壤主要以均质砂壤为主,主要分布于南部地区。

1.2 试验设计

1.2.1 野外径流小区分布及植被配置情况 将密云水库北侧太师屯镇坡耕地当作研究对象,来开展该研究。在此地区建立长宽为 10 m×5 m 试验区,数量为 8 个,对其径流开展长久的定位测量。径流监测小区底端留有径流液出口,流入径流液收集桶,径流液收集桶安装有自动计量系统。试验地安装有自动雨量计。径流小区监测时间开始于 2015 年 4 月 1 日,径流小区采样时间于 2019 年 5 月 28 日至 2019 年 9 月 30 日。

径流小区的选取通常基于合适的土壤、气候、植被结构等标准而确定,选取雀麦、野牛草、板蓝根(*Isatis tinctoria*)、苦参、薄荷、丹参和紫花苜蓿 7 种生态型且具有一定经济价值的植物与密云水库水源保护区主要种植果树板栗进行间作或单独种植。小区编号为 1—8 号,坡度均为 10°,土地利用类型为林地、林草地(表 1)。

1.2.2 径流小区取样测定 在每次降雨后 2~3 d

内,及时采集导出自动监测系统中 Grant Squirrel 2010 数据记录仪所监测记录降雨和地表水径流数据,通过对集水桶内清水的采样与检测,来获得采样的有关面源污染指标。

表 1 不同植被径流小区配置情况

植物	坡度/(°)	土地利用类型
板栗	10	林地
板栗+雀麦	10	林草地
板栗+野牛草	10	林草地
板栗+板蓝根	10	林草地
板栗+苦参	10	林草地
板栗+薄荷	10	林草地
板栗+丹参	10	林草地
板栗+紫花苜蓿	10	林草地

1.2.3 试验数据测定及计算 自然降水中所收集全部径流水采样均在市农林科学院植物营养与资源研究所实验室测定上述 5 个污染参数(TN,TP,COD,BOD₅,TOC),检测办法详情参考表 2。

表 2 试验小区土壤面源污染指标测定方法

指标	检测方法
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 ^[8]
TP	钼酸铵分光光度法 ^[9]
COD	重铬酸盐法 ^[10]
BOD ₅	稀释与接种法 ^[11]
TOC	总有机碳分析仪

选取 2019 年的 3 次天然降雨,不同植物配置模式下 TN、TP、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD₅)、总有机碳(TOC)所引起的流失量 M 进行计算,计算公式如下:

$$M_{ki}=\frac{C_{kx}R_{ix}}{1000}$$

(1)

式中: M_{ki} 代表*i*标记区域内*k*数量的污染指标所导致的流失量(kg/hm²); C_{kx} 代表*i*标记区域内*k*数量的污染指标于第*x*场降水条件下的质量浓度(mg/L); R_{ix} 代表*i*标记区域内第*x*场降水条件下的地表径流量(m³/hm²)。

2 结果与分析

2.1 不同植被配置下产流状况

根据 2015—2018 年水源保护区的降雨情况来看(图 1),6—9 月期间所产生的降雨频率最高,此阶段所产生的总体降雨量在全年内所占的比例达到了 70.75%~88.21%。其中 2015 年 7 月 21 日发生特大暴雨,19 h 内降雨量高达 112.4 mm。

对 2015—2018 年坡耕地径流流失监测和测定数据进行分析(图 2),其中 2015 年 7 月 21 日暴雨造成对照模式下径流量达到 148 m³/hm²,全年的径流

水量达到 300 m³/hm²,板栗与雀麦、野牛草、板蓝根、苦参、薄荷、丹参和紫花苜蓿立体间作模式可减少径流 56.67%~85.33%,其中板栗+苦参间作模式阻控效果最佳。2016 年板栗与雀麦、野牛草、板蓝根、苦参、薄荷、丹参和紫花苜蓿立体间作模式都不同程度上阻控坡耕地地表径流量,降低幅度范围为 21.15%~58.85%,相比 2015 年阻控效果有些下降,这与降雨量下降有关。2017 年板栗与野牛草、板蓝根、苦参和紫花苜蓿效果较好,地表径流分别下降 57.50%,57.50%,72.50%和 61.25%。2018 年监测结果显示,板栗与野牛草、板蓝根、苦参和紫花苜蓿效果仍达到最好,相对于对照处理地表径流分别下降 53.44%,63.74%,65.65%和 61.83%。

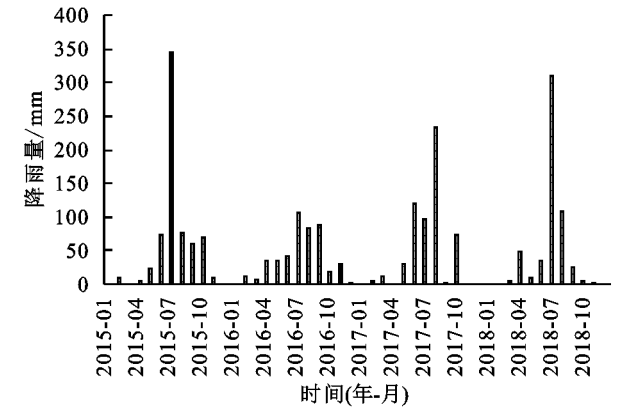


图 1 2015—2018 年监测基地降雨量变化

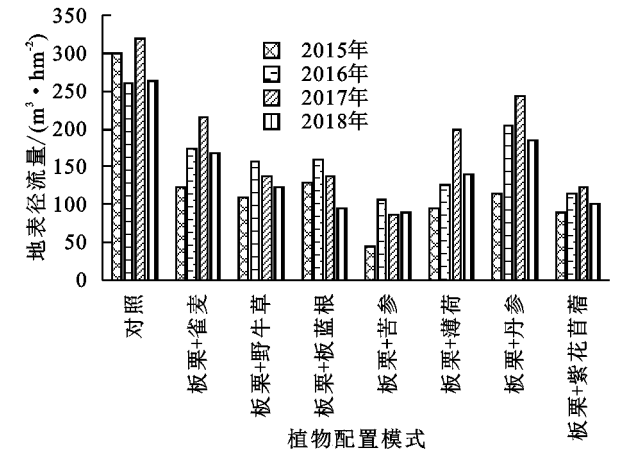


图 2 2015—2018 年天然降雨不同植物配置平均产流量

2.2 不同植被配置面源污染控制作用

在 2015—2019 年这段时间内所产生的天然降雨情况中,各种植被配置区域径流内所涉及的面源污染指标具体数值与消减率均值(图 3—4)。对于总氮来说,除板栗和紫花苜蓿间作模型外,其他间作模型处理与对照小区均无显著性差异。其中,板栗和丹参间作处理小区径流水中总氮消减率为 12.30%。径流小区径流水中总磷含量各处理小区与对照间均无显著性差异,其中苦参、薄荷、野牛草、紫花苜蓿、板蓝根与板栗间作的处理小区径流水中总磷消减率为 88.04%~

33.55%。综上所述,苦参、野牛草、薄荷、紫花苜蓿和板栗的间作模式能有效的降低坡耕地的磷素流失,丹参和板栗间作模型可在一定程度上降低坡耕地的氮素流失。除雀麦和板栗间作小区外,其他间作模式小区,分别比对照小区径流水中的 COD, BOD₅, TOC 消减率为 29.10%~95.04%, 31.49%~93.60% 和 16.76%~62.17%。

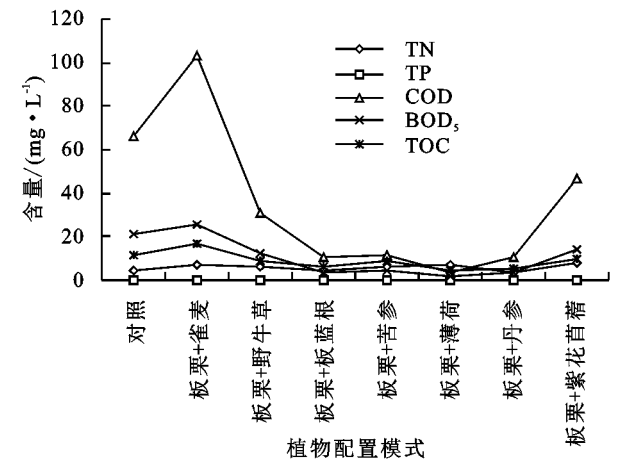


图 3 不同植物配置 3 次天然降雨面源污染防控指标含量变化

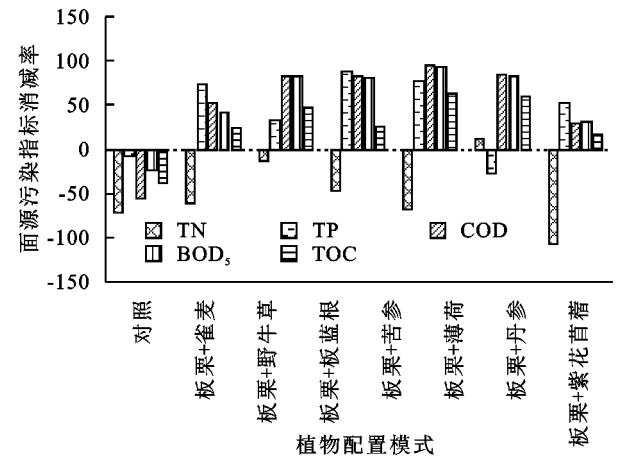


图 4 天然降雨不同植被配置小区径流中面源污染指标平均消减率

2.3 降雨对不同植被配置面源污染控制作用的影响

在此次分析过程中,主要选择了 3 场极具代表性的天然降雨,时间分别是 2019 年的 6 月 15 日、7 月 23 日以及 8 月 6 日,具体的雨强数据显示为表 3。首场的雨强均值为 16.11 mm/h,总体的降雨量数据是 96.7 mm,总计时间是 6 h;第二场的雨强均值为 14.05 mm/h,总体的降雨量数据是 112.4 mm,总计时间是 8 h;第三场的雨强均值数据是单位时间内 (h)5.66 mm,总体的降雨量数据是 62.3 mm,总计时间是 11 h。从这些数据可以看出,3 次降雨的雨强均值数据明显减少,总的降雨时间是第一场<第二场<第三场。同时伴随雨强的降低,这 3 种环境写的面源污染情

况也呈现出逐渐减少的现象。对各种植被配置所处径流小区内含有的 5 种面源污染指标数值(分别为 TN, TP, COD, BOD₅, TOC)展开相应的运算,包括 3 次降雨所相差的数值与消减比进行计算,具体数值可以作为重要指标来评估降雨 3 和多种环境中,各种类型植被配置在面源污染限制与相应消减效用上的实际效果(表 3)。

表 3 3 次天然降雨参数

降雨日期	总降雨量/ mm	最大瞬时降雨量/ (mm·min ⁻¹)	平均降雨量/ (mm·h ⁻¹)	降雨 历时/h
2019-06-15	96.7	42	16.11	6
2019-07-23	112.4	65	14.05	8
2019-08-06	62.3	30	5.66—	11

不同植物配置区域在总计 3 次的降雨环境中,植物伴随时间的流逝、降雨量的逐渐缩减、整个降雨强度的逐步降低, TN 的流失量也随着减少,其中板栗+苦参、板栗+丹参显著减小($p<0.05$),不同植物配置在 TN 上所产生的消减比都超过了 30%;TP 流失产生的改变相对偏大,不同植物配置区域中 TP 的流失模数都出现了非常明显地缩小($p<0.05$),各个植物配置对 TP 的消减比均在 50%以上,其中板栗+苦参小区呈极显著减小($p<0.01$);有机污染指标 COD, BOD₅, TOC 的变化趋势相似,不同植物配置区间内所形成的流失模数都出现了非常明显地缩小($p<0.05$),其中板栗+板蓝根、板栗+苦参、板栗+薄荷、板栗+丹参与对照相比呈极显著减小($p<0.01$),除板栗+雀麦小区以外,各个小区植物配置对有机污染指标的消减均在 70%以上,下降趋势明显(图 5—7)。

3 讨论

植物篱植物需具备较强的抗蚀能力及改善土壤团粒结构和渗透性的能力。目前研究多为单一草种植的生态阻控效果,混播的试验也大部分从增加根系生物量方面论证水土保持效果变化,而本文是通过不同植物配置模式研究其对密云水库坡耕地径流流失的消减效果,结果表明:间作板栗+苦参>板栗+紫花苜蓿>板栗+薄荷>板栗+野牛草>板栗+丹参>板栗+板蓝根>板栗+雀麦>板栗。这些成果有效表明了坡地上采取草带种植的方式可以有效改善该类型土地的水土流失情况,从而保护当地的生态环境,而不同植物配置模式对于径流流失控制效果不同,这可能是由于植物间作体系中植物根系对养分的竞争作用^[12-13]、地上地下部生物量^[14-16]和微生物分解、转化等多方面因素造成^[17-19]。而本文的研究结果表明板栗+苦参的径流量比对照降低 85.33%,对于径流流失控制效果最佳。

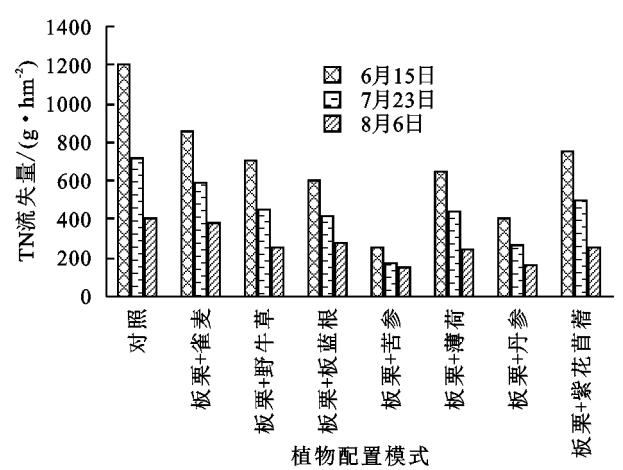


图5 不同植物配置3次天然降雨对TN消减控制

依据黄生斌等学者就密云水库地区相关面源污染荷载情况具体贡献率的深入分析,可以得出在该区域内径流水纸当中所含有的相关有机污染物质的指标分别是:COD 含有量在 70%左右,BOD₅所占比例

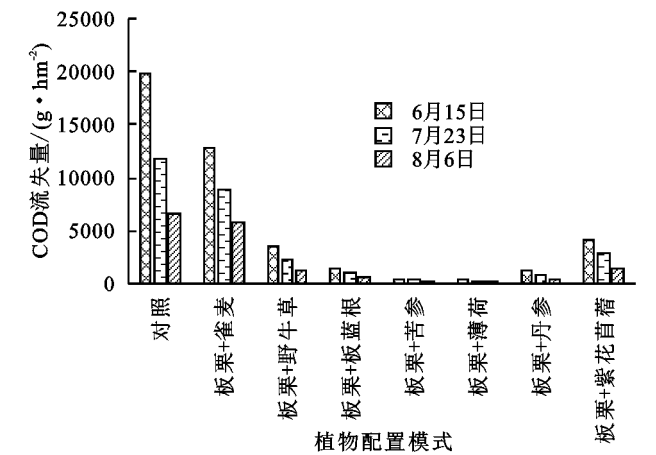
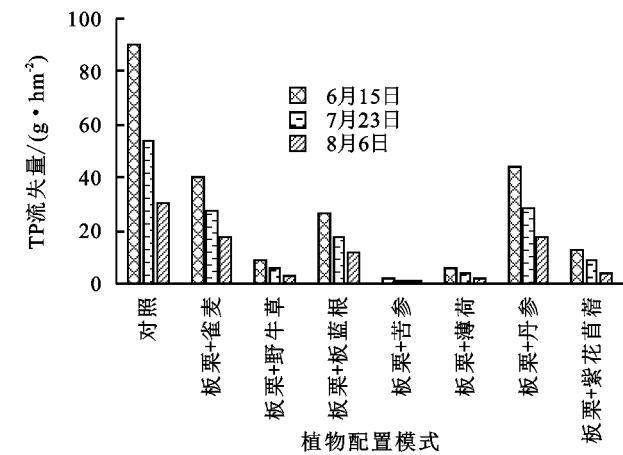


图6 不同植物配置3次天然降雨对TP,COD消减控制

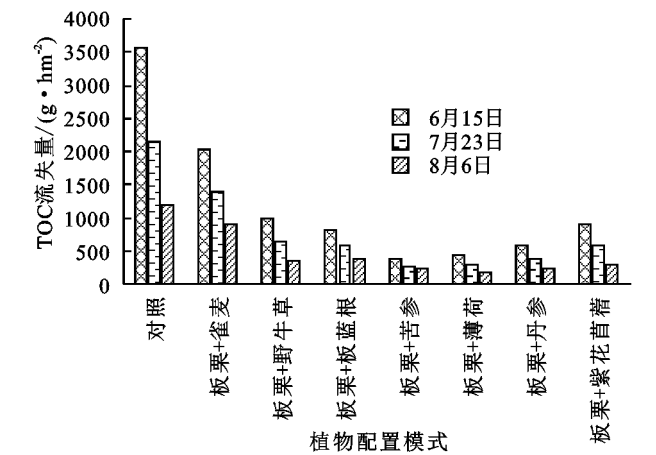
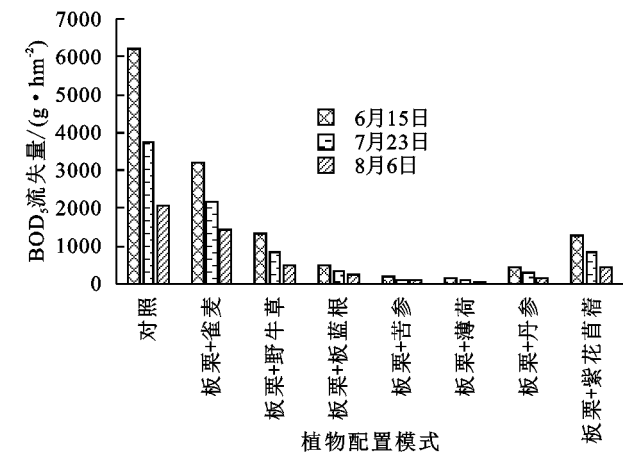


图7 不同植物配置3次天然降雨对BOD₅,TOC消减控制

4 结论

(1) 天然降雨条件下,减流作用最好的是板栗+苦参小区,平均减流作用为 70.58%,板栗+雀麦最差,但仍减流 56%。

为 70%左右,TOC 约 65%,有关养分流失的相应指标中:TN 所占比重为 70%左右,TP 约 90%^[20],大量研究表明,植物篱可以通过植物茎秆的拦截、根系的吸收、土壤的渗透及微生物的分解等多途径实现降低和控制水土流失及污染物向水体的迁移^[21]。在此次分析过程中,重点针对上述 5 种不同的面源污染指标制定了严格的监管措施,从相关数据能够说明植被配置的差异化可以在面源污染上发挥更加有效地控制效果,结果表明:植物间作的 7 个径流小区对照板栗单种小区的面源污染指标值更小,且消减比均为正值,表明植被在对面源污染生态阻控作用方面具有十分重要的意义。其中间作板栗+苦参径流小区的径流中总氮、总磷、COD, BOD₅, TOC 流失量分别降低 78.49%,98.25%,97.43%, 97.10%,89.04%,在 3 次降雨的时间推移过程中比较得到板栗+苦参配置在对面源污染的控制上有着更大的潜力,为最优的面源污染生态阻控植物配置模式。

(2) 苦参、野牛草、薄荷、紫花苜蓿和板栗的间作模式能有效的降低坡耕地的磷素流失,丹参和板栗间作模型可在一定程度上降低坡耕地的氮素流失。除雀麦和板栗间作小区外,其他间作模式小区,分别比对照小区径流水中的 COD, BOD₅, TOC 消减率为 29.10%~

95.04%, 31.49%~93.60%和 16.76%~62.17%。

(3) 间作板栗+苦参径流小区的径流中总氮, 总磷, COD, BOD₅, TOC 流失量分别降低 78.49%, 98.25%, 97.43%, 97.10%, 89.04%, 其消减作用最好, 配置作用最优, 综合评价其最适合大量推广。

参考文献:

- [1] Ji Fan, Lijiao Yan, Pei Zhang, et al. Effects of grass contour hedgerow systems on controlling soil erosion in red soil hilly areas, Southeast China[J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30(2): 107-116.
- [2] Kinama J M, Stigter C J, Ong C K, et al. Contour hedgerows and grass strips in erosion and runoff control on sloping land in semi-arid Kenya [J]. Arid Land Research and Management, 2007, 21(1): 1-19.
- [3] Zhao L S, Liang X L, Wu F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 400-409.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Donjadee S, Tingsanchali T. Reduction of runoff and soil loss over steep slopes by using vetiver hedgerow systems[J]. Paddy and Water Environment, 2013, 11(1): 573-581.
- [7] 李凯, 程金花, 陈仲旭. 密云水库库滨带不同植被配置下面源污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1183-1192.
- [8] 彭鹏, 石慧. 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定水样中的总氮[J]. 污染防治技术, 2008(2): 86-88.
- [9] 郑科, 赵亚云, 孙靖, 等. 地表水中总磷的 2 种测定方法的对比试验研究[J]. 绿色科技, 2018(22): 52-53.
- [10] 黄勇刚. 重铬酸盐法测定化学需氧量新旧方法对比研究[J]. 资源节约与环保, 2019, 206(1): 55-56.
- [11] 杨汉, 彭晓燕. 水样 BOD₅ 测定中稀释倍数的正确选取[J]. 环境污染与防治, 1992, 14(6): 28-29.
- [12] 蔡旭东, 周怡雯, 刘窑军, 等. 南方红壤区坡耕地不同耕作措施综合生态效益评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 281-287.
- [13] 吴得荣, 熊波, 熊峰, 等. 大渡河流域水电工程区水土保持植物调查与分析[J]. 中国水土保持, 2017(12): 43-47.
- [14] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407.
- [15] 李海强, 郭成久, 李勇, 等. 植物篱对坡面土壤养分流失的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 42-48.
- [16] 黎建强, 张洪江, 陈奇伯, 等. 三峡库区植物篱系统土壤颗粒分形特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 129-133, 139.
- [17] 刘强, 邓仕槐, 敬子卉, 等. 不同植物篱系统对坡耕地农田径流污染物的去除效果[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1136-1143.
- [18] 颜佩凤. 辽西坡耕地不同植物篱对水土流失及土壤养分空间分布的影响[J]. 水土保持应用技术, 2017(2): 4-6.
- [19] 胡雪琴, 蒋平, 彭旭东, 等. 紫色丘陵区不同土地利用类型径流泥沙及氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 35-39.
- [20] 黄生斌, 刘宝元, 刘晓霞, 等. 密云水库流域农业非点源污染基本特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1219-1223.
- [21] 张雪莲, 赵永志, 廖洪, 等. 植物篱及过滤带防治水土流失与面源污染的研究进展[J]. 草业科学, 2019, 36(3): 677-691.

(上接第 28 页)

- [34] 张成霞, 南志标. 土壤微生物生物量的研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(6): 50-57.
- [35] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 220-227.
- [36] 刘满强, 胡锋, 何园球, 等. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 937-944.
- [37] Myers R T, Zak D R, White D C, et al. Landscape-level patterns of microbial community composition and substrate use in upland forest ecosystems [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 359-367.
- [38] Barbhuiya A R, Arunachalam A, Pandey H N, et al. Dynamics of soil microbial biomass C, N and P in disturbed and undisturbed stands of a tropical wet-evergreen forest [J]. European Journal of Soil Biology, 2005, 40(3): 113-121.
- [39] Piao H C, Hong Y T, Yuan Z Y. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climatic factors in soils from karst areas of southwest China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30(4): 294-297.