杨树与小麦间作系统林冠层降雨再分配对地表径流和淋溶的影响

褚 军[1]，金梅娟[2]，佟思纯[3]，吴永波[3]，薛建辉[4]

（1.扬州市职业大学 江苏省农业安全生产与环境保护工程技术研究中心，江苏 扬州 225009；2.苏州市农业科学院 江苏太湖地区农业科学研究所，江苏 苏州 215155；3.南京林业大学 生物与环境学院，江苏省林业生态工程重点实验室，江苏 南京 210037；4.江苏省中国科学院植物研究所，江苏 南京 210014）

摘 要：[目的] 探讨杨树林冠层降雨再分配对地表径流量、侵蚀量和淋溶量的影响，为农林间作系统削减水土流失提供理论依据。[方法] 以太湖流域杨树与小麦作系统为研究对象，通过对 2013 年全年 101 场降雨的降雨量、林内穿透雨量、树干径流量的野外观测及对地表径流量、侵蚀量和淋溶量的样品收集进行测定分析。[结果] ①总降雨量为 943.5 mm，林内总穿透雨量、树干径流量及截留量分别为 796.2，7.3 和 140.0 mm，分别占总降雨量的 84.4%，0.8%和 14.8%。其中，降雨量＜10 mm 的中、小降雨发生最频繁，占总降雨场次的 80.2%；②穿透雨量（R^2＝0.993）和树干径流量（R^2＝0.748 4）与林外降雨量呈线性正相关关系；当降雨量大于 5.5 mm 时，树干开始产生径流；林冠截留率与降雨量呈负幂函数相关关系（R^2＝0.414 7）；除了降雨量外，林冠截留率还与林冠叶面积指数有关；③间作系统林分密度越大，冠层叶面积指数越大，林冠层对径流量和侵蚀量的削减作用就越强。④单株杨树距离树干 1.5 m 处平均穿透雨量较 0.5 m，7.5 m 处分别减少了 3.2%，9.3%，淋溶水量分别减少了 3.5%，10.8%；就单株林木而言，除降雨量外，林冠结构特征对淋溶流失起着重要作用。[结论] ①间作系统中杨树林冠层对降雨的再分配作用主要取决于降雨量，降雨量越大林冠层截留效果越不显著；②杨树密度的增大能显著减少系统内地表径流量和侵蚀量；③单株杨树在距离树干 1.5 m 处的冠层对降雨的削减作用最大，淋溶水量亦最少。

关键词：农林间作系统；降雨再分配；地表径流；淋溶

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)02-0069-08 **中图分类号**：S715.2

文献参数：褚军，金梅娟，佟思纯，等.杨树与小麦间作系统林冠层降雨再分配对地表径流和淋溶的影响[J].水土保持通报，2020，40(2)：69-76. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.010；Chu Jun，Jin Meijuan，Tong Sichun，et al. Effects of canopy rainfall redistribution on surface runoff and leaching in poplar-wheat intercropping system [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(2)：69-76.

Effects of Canopy Rainfall Redistribution on Surface Runoff and Leaching in Poplar-Wheat Intercropping System

Chu Jun[1], Jin Meijuan[2], Tong Sichun[3], Wu Yongbo[3], Xue Jianhui[4]

(1. *Yangzhou Polytechnic College, Engineering Research Center for Agricultural Security and Environmental Protection of Jiangsu Province, Yangzhou, Jiangsu* 225009, *China*; 2. *Suzhou Academy of Agricultural Sciences/Institute of Agricultural Sciences in Taihu Lake District, Suzhou, Jiangsu* 215155, *China*; 3. *College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Jiangsu Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering, Nanjing, Jiangsu* 210037, *China*; 4. *Institute of Botany Jiangsu Province, and Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu* 210014, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of canopy rainfall redistribution on surface runoff, erosion and leaching in poplar forests were discussed, in order to provide a theoretical basis for reducing soil erosion in agroforestry systems. [Methods] Taking the poplar-wheat intercropping system in Taihu Lake basin as the research

收稿日期：2019-09-20 **修回日期**：2019-11-05

资助项目：国家林业公益性行业科研专项“生境胁迫立地植被恢复与重建技术研究”（201104002）；江苏省高校自然科学研究重大项目（12KJA180003）；扬州市“绿杨金凤”人才引进项目；扬州市职业大学校级科研课题（2017ZR27）

第一作者：褚军（1984—），男（汉族），江苏省扬州市人，讲师，博士，主要从事农业面源污染方面的研究。Email：chujun911@163.com。

通讯作者：薛建辉（1962—），男（汉族），江苏省启东市人，教授，博士生导师，主要从事生物多样性保护和退化生态系统植被恢复方面的研究。E-mail：jhxue@njfu.edu.cn。

object, the surface runoff, erosion and leaching were measured and analyzed, based on the field observation of rainfall, throughfall and stem flow of 101 rainfall events in 2013. [Results] ① The total rainfall was 943.5 mm. The throughfall, stem flow and interception were 796.2 mm, 7.3 mm and 140.0 mm, respectively, accounting for 84.4%, 0.8% and 14.8% of the total precipitation. The small and medium-sized rainfall which was less than 10 mm occurred most frequently, accounting for 80.2% of the total rainfall events. ② Throughfall and stem flow were correlated with rainfall outside the forest ($R^2=0.993$, $R^2=0.748\ 4$). The stem flow started when the rainfall was greater than 5.5 mm. A negative function correlation existed between the rate of canopy interception and rainfall ($R^2=0.414\ 7$). In addition to rainfall, the rate of canopy interception was also related to canopy leaf area index. ③ The higher the intercropping system stand density, the greater the canopy leaf area index, and the stronger the effects of canopy layer on surface runoff and erosion. ④ The average throughfall at 1.5 m from the trunk of a single poplar was reduced by 3.2% and 9.3% respectively compared with that at 0.5 m and 7.5 m, and the leached water decreased by 3.5% and 10.8% respectively. Besides, canopy structure played an important role in leaching loss. [Conclusion] ① The redistribution effect of poplar canopy on rainfall in intercropping system mainly depended on rainfall. The greater the rainfall is, the less significant the interception effect is. ② The increase of poplar intercropping can significantly reduce the surface runoff and erosion in the system. ③ The canopy of a single poplar tree at 1.5 m from the stem has the greatest effect on rainfall reduction and the least amount of leaching.

Keywords: agroforestry system; rainfall redistribution; surface runoff; leaching

近年来,随着农业集约化程度的提高,化肥、农药等造成的农业面源污染已成为我国河流、湖泊等水体富营养化以及水质退化的重要污染源之一[1-3]。其中,地表径流和淋溶渗漏是农田土壤氮、磷等养分进入地表水和地下水两条主要途径,对农业面源污染的产生起着不可忽视的作用[4-5]。而水在作为土壤中氮、磷等养分流失的溶剂和载体的同时,亦是地表径流和淋溶产生的主要驱动力[6]。因此,加强对田间水分的管理对控制径流和淋溶的形成具有重要影响。目前,相关的研究主要集中于人为灌溉条件下节水灌溉[7-8]、水肥一体化[9]以及采用保护性耕作[10]等技术,而通过生态防治措施对自然降雨进行再分配来控制田间水分流失的研究相对较少。农林复合系统作为一种新型的土地利用方式,其林木冠层的存在对自然降雨的削减及再分配起到重要作用。林木冠层是降雨进入系统的第一个接触层,同时也是对降雨削减的第一道防线[11-12]。林冠层通过枝叶截留部分降雨,减少实际到达地表的降雨量[13],对雨滴亦起到溅散的作用,减缓雨滴动能,延长地表产流和汇流时间,降低林下土壤侵蚀的风险[14-15]。史宇等[16-17]通过对北京山区侧柏林林内降雨的研究发现,林内开始降雨的时间均晚于林外降雨,随延滞期雨强的增大呈对数递减趋势,林冠层对林内降雨的延滞作用能有效延长汇流时间,减少径流流量。目前,利用农林间作系统探讨水土流失的研究相对较少。本试验以太湖地区杨树与小麦(以下简称"杨麦")间作系统为研究对象,主要探讨2个问题:①间作系统下杨树林冠层对降雨截留和再分配作用有多大?②间作系统对地表径流量、侵蚀量及淋溶量的削减效果。研究结果可为进一步整体研究间作系统对土壤氮、磷流失的削减提供理论依据。

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港村,该区域是太湖流域传统粮食产地,地理坐标为119°31′—120°3′E,31°07′—31°37′N,属亚热带季风气候区。全年平均降雨量为1 277.1 mm,年平均气温15.7 ℃,无霜期239 d,降水集中于夏季(6—8月)。该区农田主要耕作方式为小麦与蔬菜轮作,土壤类型为微酸性重壤质黄泥土。

1.2 试验设计

本试验实施时间为2012年11月至2013年8月,杨树为35-杨(*Populus davidiana* cv.35.)(表1),林间种植冬小麦,于2012年11月16日播种,播前将试验小区进行翻耕。设2种杨树间作密度,株行距分别为2×5 m(L_1)和2×15 m(L_2),同时将单作小麦地L_3作为对照处理(CK)。L_1,L_2林下枯落物全部去除,每星期收集清理2~3次,确保土壤表层无枯落物覆盖;3个处理,3次重复,共9个小区。每个小区面积102 m^2,为17 m×6 m的矩形;相邻各小区之间及外围用若干个2 m×0.5 m的矩形PVC板横向垂直插入,地上部分0.1 m,地下部分0.4 m,以完全隔开各小区;每个小区顶端设1.5 m×1.5 m×1.5 m规格的径流池,用石棉瓦遮盖,用以收集径流水;同时在每

个小区埋设“L”形 PVC 管作为淋溶收集装置,淋溶孔外围包裹尼龙网,防止泥沙堵塞,深度为 0.2 m,用以收集淋溶水,埋设位置分别为距杨树种植行0.5,1.5和 7.5 m 处。

表 1　杨树林林分特征

种植类型	树龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	冠幅(东西向)/m	冠幅(南北向)/m	平均枝下高/m
2×5 m	6	12.6±0.6	13.5±1.1	5.0±0.5	4.1±0.5	3.9±0.5
2×15 m	6	12.1±1.2	13.8±1.8	6.6±0.6	4.8±0.7	4.2±0.5

1.3　研究方法

1.3.1　*林冠层对降雨再分配*

(1) 林外降雨量测定(R)。在单作小麦样地安装自动气象站(Intelimet A, US),应用 CR 1000 数据采集器测定和记录林外降雨量。

(2) 林内穿透雨的测定(T)。在间作系统内安装自动气象站(Intelimet A,美国),测定和记录林内降雨量。同时,林带样地沿蛇形曲线随机放置 5 个直径 20 cm 标准自制雨量筒,用于测定穿透雨量。在 L_2 间作系统内随机选取 3 株杨树,以树干为中心、东西向冠幅大小为设置依据,在距离树干 0.5,1.5,7.5 m 处东西向布设多个雨量筒,用于收集单株杨树冠层下不同位置的穿透雨量。

(3) 树干径流测定(S)。于树干 1.3 m 处用沿中缝剪开的直径 2 cm 的聚乙烯塑料管由上往下蛇形缠绕于树干上 2 周,用铁钉固定在树干上,塑料管与树干间空隙接缝处用玻璃胶封严,以防漏水。塑料管的下端与 10 L 加盖塑料桶相连,以收集树干径流。

树干径流量根据公式计算:

$$S=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}K_i/M_i \tag{1}$$

式中:S 为样地单位面积平均树干径流量(mm);n 为观测林木的个数;K_i 每次降雨第 i 棵树的树干径流量(mm^3);M_i 为第 i 棵树林冠投影面积(mm^2)。

(4) 林冠降雨截留量(I)。根据水量平衡原理[18],林冠截留量计算公式为:

$$I=R-T-S \tag{2}$$

式中:I 为林冠截留量(mm);R 为林外降雨量(mm);T 为穿透降雨量(mm);S 为树干径流量(mm),忽略降雨蒸发量。

林冠截留率计算公式:

$$I_0=(I/R)\times 100\% \tag{3}$$

式中:I_0 为林冠截留率。

1.3.2　*叶面积指数(LAI)*　叶面积指数是研究林分冠层结构的重要指标之一[19-20]。利用 LAI-2200 冠层分析仪(LI-COR,America)测定杨麦间作模式杨树冠层叶面积指数月变化,该仪器通过视角为 148°的“鱼眼”光学感应传感器(也可称为“鱼眼”镜头),从 5 个不同角度的天顶角方向测定冠层上下(或内外)光强的变化,并通过制备冠层内的辐射传播模型来计算冠层的 LAI。由于杨树为落叶树种,故本试验于 2013 年 4 月至 11 月每月中旬测定,共计 8 次。测定时间为晴天 8:00—10:00 或 14:00—16:00,选取有大块云层遮挡太阳的时间点进行测量,以避开强光的照射。在样地内沿蛇形曲线随机布置的固定测点测定,完成后记录整个样地的 LAI 平均值作为该样地的叶面积指数。

1.3.3　*径流、侵蚀和淋溶量的收集*　每次产生地表径流后,测量径流池中集流深度,计算径流量;随后使径流池内径流液静置,用水泵抽干上层径流液,收集径流池底部泥沙,烘干称重,计算泥沙侵蚀量。全部结束后将径流池清洗干净,以备下一次的收集与计量。淋溶水样的收集于降雨停止后进行,用小型抽水泵抽取淋溶管中淋溶液,用量筒测量淋溶流失量,淋溶液抽干后,反复清洗淋溶管,以备下一次的收集与计量。

1.4　数据处理

本文采用 Excel 2010,SPSS 20 和 Sigmapolt 12.0 对数据进行处理、分析和绘图,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)来比较不同组数据间的差异。

2　结果与分析

2.1　降雨特征

在试验观测期间(2013 年 1—12 月),共发生了 101 场降雨事件,降雨总量为 943.5 mm,低于该地区长年平均降雨量 26.1%,属于降雨量较少的年份。其中,降雨主要集中于 5—10 月,即夏季和秋季,占总降雨量的 73.9%;春季和冬季降雨量较少,仅占 26.1%。降雨经杨树林冠层被重新分配后,L_1 间作密度下穿透雨量为 796.2 mm,树干径流量 7.3 mm,林冠截留量 140.0 mm,分别占总降雨量的 84.4%,0.8%和 14.8%。由图 1 可知,9 月份林冠截留量最大,为 28.1 mm,占全年总截留量的 20.1%;而 1 月份截留量最小,为 0.6 mm,占全年的 0.4%。其中,林冠对降雨的截留能力随叶面积指数(LAI)的变化而变化,1—2 月以及 11—12 月冠层对降雨的截留量较小,分别为 1.6,5.0 mm,占总截留量的 1.1%和 3.6%。而 3—10 月冠层降雨截留量达 133.4 mm,占

总截留量的 95.3%，主要由于杨树 1—2 月和 11—12 月处于落叶期，冠层叶片脱落殆尽，对降雨的截留仅仅依靠树干、枝条等，从而降低了冠层对降雨的截留能力。而随着温度的升高，杨树开始从落叶期转为生长期，随着冠层叶片面积的增大以及叶片数量的增多，冠层叶面积指数也逐渐增大，对降雨的截留能力逐渐增强。根据降雨强度等级，将 101 场降雨划分成 5 个等级，由表 2 可知，降雨量＜10 mm 的中、小雨发生最频繁，多达 81 次，占总降雨场次的 80.2%，说明研究区多以中、小雨为主，而其降雨量仅占总降雨量的 26.5%。在整个观测期间，降雨等级为 100～250 mm 的降雨事件仅发生 1 次，其降雨量占总降雨量的 14.6%。

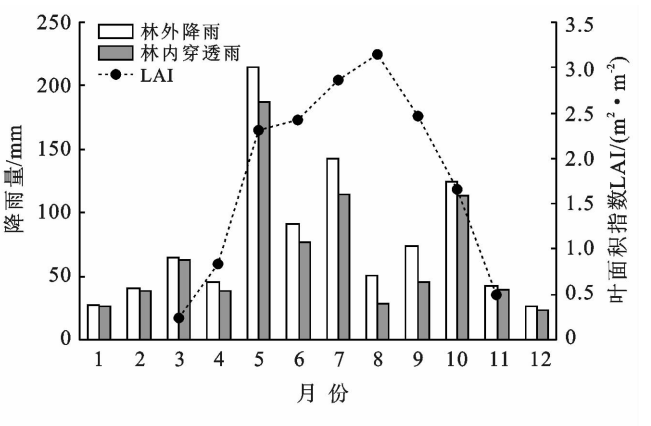


图 1 观测期间 L_1 间作系统下降雨特征

表 2 L_1 间作系统下不同降雨量级降雨再分配

降雨等级/mm	次数	降雨量 R/mm	穿透雨量 T		树干径流量 S		冠层截留量 I	
			雨量/mm	雨量/%	径流量/mm	径流量/%	截留量/mm	截留量/%
＜10	81	249.9	157.5	63.0	0.0	0.0	92.4	37.0
10～25	10	146.9	125.9	85.7	1.0	0.7	20.0	13.6
25～50	6	179.1	161.8	90.3	1.5	0.8	15.8	8.8
50～100	3	229.4	214.9	93.7	3.5	1.5	11.0	4.8
100～250	1	138.2	136.1	98.5	1.3	0.9	0.8	0.6

2.2 林内穿透雨、树干径流和林冠截留与林外降雨的关系

降雨等级是决定穿透雨量的重要因素之一，林内穿透雨的大小和再分配规律会随着降雨等级的不同而产生相应的变化[21-22]。由表 2 可知，L_1 间作密度下 101 次降雨的平均穿透雨量为 7.9 mm，平均穿透率为 86.2%。当降雨量＞10 mm 时，降雨穿透率均超过 80%，平均为 92.1%。随着降雨等级的增大，林内穿透雨率呈上升趋势，由降雨量＜10 mm 时的 63.0%上升至降雨量＞100 mm 时的 98.5%。回归分析结果表明，林内穿透雨量与林外降雨量呈线性正相关关系($R^2=0.99$)。树干径流在林冠降雨再分配过程中占有较小的比例[23-24]。在整个观测期间，树干径流共产生了 17 次，占总降雨次数的 16.8%。树干径流量为 7.3 mm，占总降雨量的 0.8%。树干平均径流量为 0.43 mm，平均径流率为 0.98%，但变化规律不明显。主要由于树干径流量的产生不仅与降雨特征有关，还与林木树种的生态学特性有关，林木冠幅、胸径、树皮结构、雨前树冠的干湿程度等对树干径流的产生有很大影响[25]，回归分析表明，树干径流量与降雨量呈线性正相关关系($R^2=0.75$)。当林外降雨量＞5.5 mm 时，可能开始产生树干径流，并随着降雨等级的增大而增大。由表 2 可知，林冠截留总量为 140.0 mm，占总降雨量的 14.8%，平均林冠截留量为 1.4 mm。通常采用林冠截留率来表示林冠对降雨的截留能力[25]。在不同的降雨等级中，林冠截留率变化范围 0.6%～37.0%，平均林冠截留率为 13.0%。回归分析结果表明，林冠降雨截留率与降雨量呈负幂函数相关关系($R^2=0.41$)。林冠截留率随着降雨量的增大呈先急剧降低后逐渐趋于稳定的趋势，林冠层对降雨量＜10 mm 的截留率达 37.0%，主要由于降雨量较小时，大部份降雨被林冠枝条、叶片吸收和拦截，林冠层对降雨的再分配作用显著；随着降雨等级的增大，林冠截留率逐渐减小，当降雨量超过林冠蓄水量后，林冠层达饱和状态，降雨几乎全部转化为穿透雨。而降雨量＞100 mm 时，林冠截留率仅为 0.6%。除了降雨量外，林冠截留率还取决于林冠结构特征，林分结构越复杂，郁闭度越大，叶面积指数越大，对降雨的吸附拦截能力就越强[26-27]。

2.3 林冠层对径流量、侵蚀量流失特征的影响

2.3.1 L_1 间作系统下 3 次径流事件降雨分配特征

在观测期间选择 3 次较明显的径流事件，分别发生于 5 月 16 日、6 月 21 日和 7 月 6 日。由表 3 可知，3 次径流事件降雨量均＞50 mm，降雨累积量达 309.5 mm，占总降雨量的 32.8%。其中，L_1 间作密度下累积穿透雨量为 296.8 mm，占总穿透雨量的 37.3%，平均穿透雨量为 98.9 mm，平均穿透率为 95.5%。

穿透雨量随降雨量的变化而变化,而穿透率一方面与降雨强度呈正相关关系,降雨强度越大,单位时间内到达冠层的降雨量越大,雨滴对冠层的冲击越大,历时也短,不利于冠层对雨水的吸附,易形成穿透雨,增大降雨的穿透率[28]。另一方面与林冠叶面积指数(LAI)相关,5—7 月叶面积指数逐渐增大,同时降雨强度减小,导致穿透雨率呈减小趋势。在 3 次事件中都产生了树干径流,径流累积量为 4.4 mm,占树干总径流量的 60.3%,平均径流量为 1.5 mm,平均径流率为1.6%,但变化规律不明显。以 5 月 16 日和 6 月 21 日 2 场降雨为例,6 月 21 日的降雨量远低于 5 月 16 日的降雨量,而 6 月 21 日的径流量较 5 月 16 日大,分别为 1.61 和 1.26 mm,相应的树干径流率分别为 2.2%和 0.9%。3 次事件林冠对降雨的截留累积量为 8.3 mm,占总截留量的 5.9%,平均截留量为 2.8 mm,平均截留率为 2.9%,由于 3 次降雨等级较大,林冠对降雨的吸附达到饱和,因此截留量仅占降雨量的很少部分,其余的降雨几乎全部转化为穿透雨,致使林冠截留率较低。

表 3　L_1 间作系统下 3 次径流事件降雨再分配特征

日期	降雨量 R/mm	降雨强度/(mm·h^{-1})	穿透雨量 T		树干径流量 S		截留量 I	
			雨量/mm	比例/%	径流量/mm	比例/%	截留量/mm	比例/%
20130516	138.23	10.84	136.14	98.49	1.26	0.91	0.83	0.60
20130621	74.15	9.97	71.36	96.24	1.61	2.17	1.18	1.59
20130706	97.15	5.18	89.29	91.91	1.57	1.62	6.29	6.47

2.3.2　林冠对径流量、侵蚀量的影响　去除地表枯落物后,2 种杨麦间作密度下林冠对地表径流量和土壤侵蚀量的影响详见表 4。由表 4 可知,同一降雨等级下,间作系统中林分密度越大,冠层叶面积指数越大,林冠层对径流量和侵蚀量的削减作用越强,削减效果表现为:$L_1>L_2>L_3$。3 次径流事件中,L_1 平均径流量和侵蚀量比 L_2,L_3 分别减少了 7.9%,11.2%和 10.5%,16.6%,L_2 比 L_3 减少了 2.8%和 6.0%。方差及显著性分析结果表明,L_1 径流量及侵蚀量与 L_3 存在显著差异($p<0.05$),L_2 与 L_3 差异不显著($p>0.05$)。研究发现,在降雨强度相当的条件下,林冠对径流量和侵蚀量的影响随降雨量的增大呈下降趋势,以 5 月 16 日和 6 月 21 日两场降雨为例,5 月 16 日的降雨量远大于 6 月 21 日的降雨量,而 5 月 16 日 L_1 径流量和侵蚀量比 L_2,L_3 分别减少了 7.2%,12.2%和 9.6%,17.1%,L_2 比 L_3 减少了 2.7%和 5.5%;6 月 21 日 L_1 径流量和侵蚀量比 L_2,L_3 分别减少了 11.9%,13.3%和 15.6%,21.7%,L_2 比 L_3 减少了 4.2%和 9.7%。5 月 16 日 L_1 径流量和侵蚀量的削减幅度比 6 月 21 日减少了 38.3%和 21.4%。7 月 6 日林冠对径流量及侵蚀量的影响最小,L_1 径流量和侵蚀量比 L_2,L_3 分别减少了 6.6%,8.0%和 8.7%,11.8%,L_2 比 L_3 减少了 2.3%和 4.2%。主要由于 7 月 6 日小麦刚收割,一方面缺少了小麦冠层对降雨的削弱作用,另一方面人为干扰后,表层土壤较为松散,致使淋溶流失增大,对径流、侵蚀量的影响降低。

表 4　地表径流量、侵蚀量流失特征

日期	径流量/(m^3·hm^{-2})			侵蚀量/(kg·hm^{-2})		
	L_1	L_2	L_3	L_1	L_2	L_3
20130516	166.50±3.87^a	179.33±6.00^b	184.23±6.75^b	668.95±30.73^a	762.09±30.02^b	806.62±62.00^b
20130621	69.30±2.87^a	78.65±4.08^{ab}	82.10±8.81^b	288.56±27.10^a	333.01±46.51^{ab}	368.59±37.39^b
20130706	133.90±4.50^a	143.30±2.06^b	146.72±5.08^b	429.41±22.80^a	466.67±22.85^{ab}	486.93±27.14^b

注:同行不同字母表示处理间存在显著差异(LSD, $p<0.05$)。下同。

2.4　林冠层对淋溶特征的影响

为减少林木根系对淋溶流失的影响,故在降雨停止后即刻对淋溶管中淋溶液进行抽取测量。由表 5 可知,同一降雨条件下,L_2 间作密度下距离树干 1.5 m 处穿透雨量最少,即 7.5 m 处穿透雨量>0.5 m>1.5 m。1.5 m 处平均穿透雨量为 37.8 mm,较 0.5 m,7.5 m 处分别减少了 3.2%和 9.3%,0.5 m 较 7.5 m 处减少了 6.3%。1.5 ~0.5 m 处穿透雨量变化幅度较 1.5~7.5 m,0.5~7.5 m 处分别减少了 65.6%和 49.2%,主要与林木的冠层结构以及降雨量、降雨强度有关。

回归分析结果表明,淋溶水量与穿透雨量呈正相关关系($R^2=0.86$),随穿透雨量变化而变化。在观测期间,1.5 m 处平均淋溶水量最少,为 0.78 L,较 0.5 m,7.5 m 分别减少了 3.5%和 10.8%,0.5 m 较 7.5 m 减少了 8.5%。方差及显著性分析结果表明,5 月

30 日 0.5 m,1.5 m 处平均淋溶量与 7.5 m 处存在显著差异($p<0.05$),而 4 月 20 日和 6 月 21 日距树干不同距离差异不显著($p>0.05$),主要由于 4 月份叶面积较小,叶面积指数较小,叶片对降雨的削减作用较弱;而 6 月降雨量和降雨强度较大,一方面对冠层叶片撞击较大,易转化为穿透雨;另一方面当降雨量超过林冠的蓄水能力后,降雨几乎转化为穿透雨,降低了林冠对降雨的截留作用。

表 5 距树干不同距离降雨再分配和淋溶流失特征

日期	降雨量/mm	降雨强度/(mm·h^{-1})	穿透雨量/mm			淋溶量/L		
			0.5 m	1.5 m	7.5 m	0.5 m	1.5 m	7.5 m
20130420	22.12	2.33	21.14	20.25	22.07	0.41±0.13^{a}	0.41±0.10^{a}	0.47±0.10^{a}
20130530	29.02	1.59	24.57	23.31	28.94	0.47±0.02^{a}	0.45±0.03^{a}	0.58±0.06^{b}
20130621	74.15	9.97	71.41	69.86	74.08	1.52±0.44^{a}	1.49±0.40^{a}	1.58±0.33^{a}

3 讨 论

3.1 穿透降雨

不同降雨等级下,穿透雨量都占有较大比例。观测期间穿透雨量为 796.2 mm,占总降雨量的 84.4%。一般认为,穿透降雨由直接穿过冠层间隙到达地表面的自由穿落雨和被冠层叶尖集聚或枝条截持后溅散滴落的冠滴雨 2 部分构成[29]。本研究中,由于杨树为落叶树种,在杨树落叶期(1—2 月份和 11—12 月份),多为自由穿落雨,整个穿透雨量与降雨量呈线性正相关关系($R^2=0.99$),随着降雨量的增大呈递增趋势,而此期间冠层对降雨的截留仅为枝干的拦截与吸附。随着季节的变化(3—10 月),杨树叶面积指数变大,冠层结构异质性也增大,因此这期间穿透降雨多为冠滴雨。当降雨量较小时,林冠由于茂密的枝叶能够截留大部分降雨,此时冠层结构特征对穿透雨的拦截作用占主导作用[30]。随着降雨等级的增大,林冠截留能力急剧下降,当林冠饱和或超过林冠的最大截留能力时,叶面积主导作用降低,冠层结构特征的影响逐渐削弱,林内穿透雨逐渐也趋于稳定[25]。就单株杨树来说,距树干不同距离上方对应的冠层结构特征均不一致,从而穿透雨的空间分布存在差异[30]。在相同降雨条件下,穿透雨量随着与植株冠层厚度、盖度、叶面积指数、开枝角度等结构以及研究地点、降水大小、气候条件等有关。

3.2 树干径流

与穿透雨相似,当树干吸水饱和后会产生树干径流,同时枝叶所拦截的降雨汇集后顺树干流下也会形成树干径流[29]。研究期间,树干径流总量为 7.3 mm,仅占总降雨量的 0.8%树干径流之所以比重较低,一方面与林外降雨量有关[25],另一方面还与林木胸径、树干表面粗糙度、树冠枝条的疏密以及主侧枝夹角大小等有关[31-32]。研究发现,当降雨量>5.5 mm 时,树干径流才有可能产生,因此,降雨等级是影响树干径流量的主导因子,随着降雨等级的增大呈递增的趋势,与范世香等[33]研究结论一致。另外,树干径流以“点”的形式向地表输入,降低了地表径流产生的风险,同时也延缓了降雨到达地表的时间[34]。Owens 等[35]研究表明,降雨强度较大时,降雨 1 h 后出现径流。在降雨条件相同的情况下,树干胸径越大,冠幅越大,使得树干径流的汇水面积增加,产生的径流量也越大[25,31]。有研究表明,降雨强度的增大会提高传输过程中树干径流以穿透雨形式滴落的概率,从而使树干径流率会维持在一定的范围内[36-37]。

3.3 林冠层截留作用

本研究在不同的降雨等级中,林冠截留率变幅为 0.6%~37.0%,平均林冠截留率为 13.0%,林冠截留率随降雨等级的增大呈下降的趋势。一般认为,林冠截留率随降雨量、降雨强度有关。降雨量越大,降雨强度越大,雨滴对冠层的冲击力越大,枝叶表面的水滴易滴落,削弱了林冠截留的功能[38]。除了受降雨强度影响外,冠层截留能力还与树种组成、林龄、冠层厚度、叶面积指数、枝叶干燥度以及气候环境等特征有关[26-27]。研究发现,随着杨树的生长周期,林冠对降雨的月截留率呈先上升后下降的趋势,除了与降雨条件有关,还与冠层结构和叶面积指数有关。林冠截留率月动态变化与叶面积指数(LAI)月变化呈线性正相关关系($R^2=0.51$)。另外,Pook 等[39]和 Carlyle-Moses[40]等认为在降雨期间由于湿度较大,大气中雨、雾等与冠层接触在其表面形成的雾露水,一定重量后形成大水滴,在重力作用下从叶片表面滑落,进而转化为穿透雨,削弱了叶片的截留能力。

3.4 林冠对水土流失的作用

在去除地表枯落物后,林冠对降雨的再分配能够对地表径流量、侵蚀量和淋溶量起到一定的控制作用。研究表明,导致水土流失的动力因子主要是降

雨[41],而林冠层作为降雨进入系统的第一道防线,不仅能对降雨量起到截留作用,而且能够改变雨滴下落的能量,减少雨滴对地表的冲击。殷晖等[42]研究发现雨滴速度、雨滴势能等参量与土壤侵蚀关系密切,林冠截留对降雨总势能的消减量可达 52.15%,从而减少了降雨对林地地表的直接冲击作用。另外,林冠的厚度越大,对穿透降雨势能的缓冲作用也就越大。对于淋溶流失而言,淋溶流失量随降雨量的变化而变化,研究表明,在同一降雨条件下,距离树干 7.5 m 处穿透雨量>距离树干 0.5 m 处穿透雨量>距离树干 1.5 m 处穿透雨量。此结果与次仁曲西等[26]、盛后财等[30]结果类似,即距树干距离越近,穿透雨率不一定越小。而淋溶流失量亦在距离树干 1.5 m 处最小,除降雨条件外,主要与垂直上方的冠层结构有关。观察发现,在距离树干 1.5 m 处冠层枝叶较厚,因此冠层对降雨的截留量就越大,致使 1.5 m 处到达地表的降雨量也最少,淋溶流失量减少。

4　结 论

(1) 研究期间总降雨量为 943.5 mm,其中以降雨等级<10 mm 的中、小雨为主。L_1 间作密度下降雨经林冠层被重新分配后,穿透雨量($R^2=0.99$)、树干径流量($R^2=0.75$)与降雨量呈线性正相关关系,而林冠截留率与降雨量呈负幂函数相关关系($R^2=0.41$),平均截留率为 13.0%。当降雨量>5.5 mm 时,可能开始产生树干径流,并随着降雨等级的增大而增大。尽管影响林冠对降雨再分配的因素较多,但降雨等级以及冠层结构(LAI)仍是决定再分配特征的最主要因素。

(2) 3 次径流事件降雨量均>50 mm,L_1 间作密度下林冠对降雨的截留累积量仅为 8.3 mm,平均截留率为 2.9%。林冠层对径流量和侵蚀量的削减作用随着林分密度、冠层叶面积指数的增大而增大,削减效果表现为:$L_1>L_2>L_3$。L_1 平均径流量和侵蚀量比 L_2,L_3 分别减少了 7.9%,11.2%和 10.5%,16.6%,L_2 比 L_3 减少了 2.8%和 6.0%。L_1 径流量及侵蚀量与 L_3 存在显著差异($p<0.05$),L_2 与 L_3 差异不显著($p>0.05$)。

(3) L_2 间作密度下距离树干不同距离穿透雨量和淋溶水量存在差异。其中,距离树干 1.5 m 处穿透雨量和淋溶水量最小,较 0.5 m,7.5 m 处分别减少了 3.2%,3.5%和 9.3%,10.8%。5 月 30 日 0.5 m,1.5 m 处平均淋溶量与 7.5 m 处存在显著差异($p<0.05$),而 4 月 20 日和 6 月 21 日距树干不同距离差异不显著($p>0.05$)。

[参 考 文 献]

[1] 杨林章,吴永红.农业面源污染防控与水环境保护[J].中国科学院院刊,2018,33(2):168-176.

[2] Ouyang Wenjuan, Li Zhe, Liu Jing, et al. Inventory of apparent nitrogen and phosphorus balance and risk of potential pollution in typical sloping cropland of purple soil in China: A case study in the Three Gorges reservoir region [J]. Ecological Engineering, 2017,106:620-628.

[3] Zhang Wenqiang, Jin Xin, Liu Dong, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river: Fuyang River in Northern China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017,55(5):41-48.

[4] 吴永红,胡正义,杨林章.农业面源污染控制工程的"减源—拦截—修复"(3 R)理论与实践[J].农业工程学报,2011,27(5):1-6.

[5] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的"4R"理论与工程实践:总体思路与"4R"治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.

[6] 张树楠,肖润林,刘锋,等.生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J].环境科学,2015,36(12):4516-4522

[7] 俞双恩,李偲,高世凯,等.水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J].农业工程学报,2018,34(7):128-136.

[8] Shao Guangcheng, Wang Minghui, Yu Shuang'en, et al. Potential of controlled irrigation and drainage for reducing nitrogen emission from rice paddies in Southern China [J]. Journal of Chemistry, 2015(5):1-9.

[9] 单立楠,丁能飞,王洪才,等.蔬菜地面源污染生态拦截系统与效果[J].农业工程学报,2013,29(20):168-178.

[10] 宿敏敏,王晓军,高洪生,等.耕作措施与氮肥对黑土流失及氮损失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):58-65,163.

[11] 张捷,刘洋,张健,等.马尾松人工林林冠层降雨再分配及其氮磷特征[J].生态学杂志,2014,33(6):1451-1458.

[12] 刘希庆,邢晓光,刘凤婵.河北省太行山 4 种经济林林冠层的水文效应[J].水土保持通报,2019,39(2):83-87.

[13] 黄团冲,贺康宁,王先棒.青海大通白桦林冠层降雨再分配与冠层结构关系研究[J].西北林学院学报,2018,33(3):1-6.

[14] 曹光秀,赵洋毅,段旭,等.滇中高原常绿阔叶林对天然降雨雨滴动能的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):146-159.

[15] Gomez J A, Vanderlinden K, Giraldez J V, et al. Rainfall concentration under olive trees [J]. Agricultural Water Management, 2002,55(1):53-70.

[16] 史宇,余新晓,张佳音.北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应[J].生态学报,2013,33(13):4199-4204.

[17] 史宇,余新晓,张建辉,等.北京山区侧柏林冠层对降雨动力学特征的影响[J].生态学报,2013,33(24):7898-7907.

[18] 刘泽彬,王彦辉,田奥,等.六盘山半湿润区坡面华北落叶松林冠层截留的时空变化及空间尺度效应[J].水土保持学报,2017,31(5):231-239.

[19] 刘泽彬,王彦辉,刘宇,等.宁夏六盘山半湿润区华北落叶松林冠层叶面积指数的时空变化及坡面尺度效应[J].植物生态学报,2017,41(7):749-760.

[20] Sonnentag O, Talbot J, Chen J M, et al. Using direct and indirect measurements of leaf area index to characterize the shrub canopy in an ombrotrophic peatland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007,144(3/4):200-212.

[21] 刘泽彬,王彦辉,邓秀秀,等.六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征[J].生态学报,2017,37(10):3471-3481.

[22] Staelens J, De Schrijver A, Verheyen K, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception within a single beech(*Fagus sylvatica* L.) canopy: Influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology [J]. Hydrological Processes, 2008,22(1):33-45.

[23] Marin C T, Bouten W, Sevink, J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in Western Amazonia [J]. Journal of Hydrology, 2000,237(1/2):40-57.

[24] 杜妍,孙永涛,李宗春,等.苏南马尾松林分冠层水文过程对降雨的响应特征[J].北京林业大学学报,2019,41(6):120-128.

[25] 田风霞,赵传燕,冯兆东,等.祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素[J].生态学报,2012,32(4):1066-1076.

[26] 次仁曲西,毕华兴,潘迪,等.晋西黄土区单株油松树下穿透雨空间分布特征研究[J].水土保持通报,2013,33(5):161-164.

[27] 周彬,韩海荣,康峰峰,等.太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J].生态学报,2013,33(5):1645-1653.

[28] 曹云,黄志刚,郑华,等.柑桔园林下穿透雨的分布特征[J].水科学进展,2007,18(6):853-857.

[29] 夏体渊,吴家勇,段昌群,等.滇中3种林冠层对降雨的再分配作用[J].云南大学学报(自然科学版),2009,31(1):97-102.

[30] 盛后财,蔡体久,俞正祥.大兴安岭北部兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林下穿透雨空间分布特征[J].生态学报,2016,36(19):6266-6273.

[31] 曹云,黄志刚,欧阳志云,等.湖南省张家界马尾松林冠生态水文效应及其影响因素分析[J].林业科学,2006,42(12):13-20.

[32] 何常清,薛建辉,吴永波,等.岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配[J].应用生态学报,2008,19(9):1871-1876.

[33] 范世香,裴铁番,蒋德明,等.两种不同林分截留能力的比较研究[J].应用生态学报,2000,11(5):671-674.

[34] Manfroi O J, Koichiro K, Nobuaki T, et al. The stemflow of trees in a Bornean lowland tropical forest [J]. Hydrological Processes, 2004,18(13):2455-2474.

[35] Owens M K, Lyons R K, Alejandro C L, et al. Rainfall partitioning within semiarid juniper communities: Effects of event size and canopy cover [J]. Hydrological Processes, 2006,20(15):3179-3189.

[36] Garcia-Estringana P, Alonso-Blazquez N, Alegre J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs [J]. Journal of Hydrology, 2010,389(3/4):363-372.

[37] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate [J]. Hydrological Processes, 2000,14(16/17):2903-2920.

[38] 张学龙,罗龙发,敬文茂,等.祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应[J].山地学报,2007,25(6):678-683.

[39] Pook E W, Moore P H R, Hall T. Rainfall interception by trees of *Pinus radiata* and *Eucalyptus viminalis*, in a 1 300 mm rainfall area of southeastern New South Wales(Ⅰ): Gross losses and their variability [J]. Hydrological Processes, 1991,5(2):127-141.

[40] Carlyle-Moses D E, Laureano J S F, Price A G. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico [J]. Journal of Hydrology, 2004,297(1/4):124-135.

[41] 舒若杰.降雨能量对水土流失的影响研究进展[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):196-200.

[42] 殷晖,关文彬,薛肖肖,等.贡嘎山暗针叶林林冠对降雨能量再分配的影响研究[J].北京林业大学学报,2010,32(2):1-5.