黄土高塬沟壑区苹果林冠截留特征

杨文强，王艳萍，张青峰

（西北农林科技大学 资源环境学院，陕西 杨凌 712100）

摘　要：以黄土高塬沟壑区的典型代表长武塬为研究区，基于对 45 场降雨的实测数据，分析了苹果林的林冠截留特征，量化了林冠对降雨的分配比例。结果表明，17 年生苹果林穿透雨量、树干径流量、林冠截留量分别占大气降雨量的 75%～97%，0.2%～1.6%，2%～25%。穿透雨量与降雨量呈凹形抛物线关系，树干径流量与降雨量的关系可近似用直线方程表达，由三次多项式表达的林冠截留量与降雨量关系与实测值的拟合程度最高。

关键词：苹果林；林冠截留；穿透雨量；树干径流量

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2013)02-0093-04　　**中图分类号**：S715.2

Canopy Interception Characteristics of Apple Trees in Gully Region of Loess Plateau

YANG Wen-qiang, WANG Yan-ping, ZHANG Qing-feng

(*College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Changwuyuan as a representative landform in the gully region of Loess Plateau was selected as the study area of this study. We analyzed canopy interception characteristics of apple trees and quantified canopy allocation of rainfall based on field observations during 45 rainfall events. The results showed that throughfall, stemflow and canopy interception accounted for 75%～97%, 0.2%～1.6%, and 2%～25% of the total rainfall, respectively. The relationship between throughfall and total rainfall could be described roughly by a parabolic curve with upward opening and that between stemflow and total rainfall by a linear equation. The relationship between canopy interception and total rainfall was cubic polynomial, which had the highest fitting degree with the observed values.

Keywords: apple forest; canopy interception; throughfall; stemflow

林木冠层截留直接参与土壤—植物—大气连续体水分循环，在区域水文循环过程中起重要作用，是森林水文学研究热点之一[1]。降雨到达林木冠层时，林冠发生截留作用，对降雨进行第一次分配，形成了穿透雨、树干径流和林冠截留 3 部分。穿透雨量和树干径流量之和称为林内降雨量；林外降雨量与林内降雨量的差值即为林冠截留量[2]。由于林冠的截留作用，雨滴动能减小，对地表的打击力减弱，减轻了发生地表侵蚀的危险；同时林冠也截蓄了一部分降雨量，减少了地表产流量，起到了削减洪峰流量和涵养水源的生态功能；此外，林冠截留作用对土壤—植物—大气系统各界面之间水热交换具有重要地影响[3]。林冠截留量主要消耗于降雨结束后冠层表面的水分蒸发，减少了林内土壤水分的有效补给。研究表明[4-5]，森林林冠截留率可达 10%～50%，这是森林流域不可忽视的水量损失。

黄土高原是我国主要的旱作农业生产区，该地区降水少且年内年际分布不均，水分是限制作物生长的主要因子。近年来，苹果在黄土高原大面积种植，已成为高塬沟壑区最主要的经济林，是当地农业经济的支柱产业。然而，目前对大面积苹果林水文效应的研究尚不深入，已有研究主要集中于对苹果林地土壤水分的调查[6-8]，有关苹果林地林冠截留及水量平衡及林冠截留的研究鲜有报道。因此，以黄土高塬沟壑区的典型代表长武塬为研究区，通过分析苹果林的林冠截留特征，量化林冠对降雨的分配比例，以期为黄土高塬沟壑区大面积苹果经济林土壤—果树—大气系统的水分循环及水资源的优化利用提供科学依据。

收稿日期：2012-02-21　　**修回日期**：2012-05-31

资助项目：中国科学院知识创新工程项目“长武县水资源状况、降水集蓄模式与旱作农田生产力适度开发技术”(KSCX-YW-09-07)

作者简介：杨文强(1985—)，男(汉族)，陕西省宝鸡市人，硕士研究生，主要从事森林水文研究。E-mail：ywq200640402101@163.com。

通信作者：张青峰(1974—)，男(汉族)，山西省孝义市人，博士，副教授，主要研究方向为土地资源和生态修复。E-mail：zhqf@nwsuaf.edu.cn。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验在中国科学院长武农业生态试验站王东沟小流域进行。王东沟小流域位于长武县城以西 12 km 的陕甘交界处(107°40′30″—107°42′30″ E,35°12′16″—35°16′00″ N),属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 9.1 ℃,无霜期 171 d,降水年际间变异大,最大年降水量为 813.2 mm,最小年降水量为 369.5 mm,多年平均降水量为 584.1 mm,降雨主要集中在 7—9 月,约占全年降水量的 55%以上。该地是典型的黄土高塬沟壑区,塬面海拔 1 215～1 226 m,主要土壤类型为黏黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,非饱和层深厚,水分稳定入渗率为 1.35 mm/min,田间持水量为 21%～23.8%,萎蔫系数为 9%～12%[9]。地下水埋深 50～80 m,不参与土壤水分循环。

1.2 试验林地调查

试验苹果林地呈东西走向,长 70 m,宽 16 m,面积 1 120 m^2,地势平坦,无人工灌溉。试验林为 17 年生富士苹果树,品种均一,长势一致,无病虫害。平均树高 3.5 m,平均冠幅 3 m,平均胸径 14 cm。株距 3.5 m,行距 4 m,林分密度 720 株/hm^2,郁闭度为 0.79,林下覆盖有三叶草。果园定期进行病虫害防治,适时拉枝剪梢,保墒追肥,定期清除杂草,果树生长管理措施在该区域具有典型代表性。

1.3 研究方法

1.3.1 大气降水(P)的测定 大气降水量由安置在试验地附近开阔处的自动气象站实时观测,自动记录降雨期间每小时内的降水量(mm)。

1.3.2 穿透雨(T_f)的测定 在试验林地内随机选择 10 个点,每个点上放置雨量筒(内径 20 cm,高度 30 cm)并在其上沿处加置一个与筒口横截面积相同的漏斗,用于收集林内穿透雨量。在单次降水事件结束后 1 h 内测量记录穿透雨量(ml)。

1.3.3 树干径流(S_f)的测定 在试验林地内选择 10 株标准果树。将沿直径剖开的橡胶管螺旋形地缠绕于每株果树的主干上,保证至少缠绕 2 圈,使橡胶管上沿与树干接触处敞开,便于树干雨水流入橡胶管,用防水胶密封橡胶管下沿与树干接触处,确保不漏水。将橡胶管下端导入细口承接容器(10 L 塑料桶),收集降水过程中沿树干流下的雨水。降水结束后 1 h 内测量记录树干径流量(ml)。

1.3.4 树冠投影面积(CPA)的测定 单株果树的树冠投影面积采用样线法测算。首先,以树干基部为圆心划设半径为 x 的圆形样地,确保果树枝条在圆形样地范围之内;然后,从正北方向开始,按方位角 0°,120°,240°分别拉设 3 条半径为样线;最后,在晴天的正午,测量树冠投影在 3 条样线上的总长度 L。树冠投影面积与圆形样地面积的比值等于 L 与 $3x$ 的比值[10]。

基于雨量筒横截面积将收集到的穿透雨量换算为单位面积上的水深(mm);同理根据每株果树的树冠投影面积将对应的树干径流量换算为其干流水深(mm)。由水量平衡原理可知,冠层截留量(I)=降雨量(P)-穿透雨量(T_f)-树干径流量(S_f)。

2 结果与分析

2.1 降水特征和再分配特征

试验于 2011 年 5—9 月进行。试验期间共发生 57 场降雨,降雨总量为 487.4 mm,平均单场降雨量为 8.6 mm,占年均降雨量的 83%,符合黄土高原地区降雨集中的特征。单场降雨的最小降雨量为 0.2 mm,最大降雨量为 37.8 mm,最小雨强为 0.2 mm/h,最大雨强为 12.2 mm/h,平均雨强为 1.4 mm/h。雨强小于 1 mm/h 的降雨频度达到了 56%,雨强小于 2 mm/h的频度达到了 88%,雨强大于 4 mm/h 的降雨频度为 7%。

试验期间共有 45 场降雨观测到了穿透雨,林内穿透降雨总量为 442.4 mm,占林外降雨总量的 90%。单场降雨的穿透率变化范围为 75%～97%,平均为 91%。林外降雨量小,穿透雨量亦小,单场最小林外降雨量为 0.2 mm,未观测到穿透雨量;随着林外降雨量的增大,林内穿透降雨量增加,单场最大林外降雨量为 37.8 mm,林内穿透雨量达到 34.7 mm。

试验期间共有 37 场降雨观测到了树干径流,树干径流总量为 6.3 mm,占林外降雨总量的 1.3%,集中输入在果树主根系附近的土壤中,单场树干径流量平均为 0.17 mm。单场降雨的干流率变化范围为 0.2%～1.6%,平均干流率为 1.1%。在降雨量 $P<0.2$ mm 时,林冠截留蓄水未达到饱和状态,没有产生树干径流。

依据截留量计算公式,试验期间林冠截留总量为 38.7 mm,单场降雨的截留率变化范围为 2%～25%,平均为 8.4%,以蒸发形式损失。

表 1 为试验期间具有典型代表性的 10 场降雨的再分配特征。由表 1 可以看出,穿透雨量占降雨量的比例很大,为 75%～97%,截留量次之,为 2%～25%,树干径流量最小,为 0.2%～1.6%。

表 1　研究区 10 次降水事件的林冠再分配特征

降雨量/mm	平均雨强/(mm·h^{-1})	穿透雨量/mm	树干径流量/mm	截留量/mm
20.8	1.1	18.5	0.32	2.0
1.2	0.4	1.1	0.00	0.1
12.2	12.2	10.9	0.17	1.1
32.8	3.6	29.8	0.50	2.5
6.2	6.2	5.8	0.05	0.3
4.8	0.4	4.7	0.02	0.1
9.0	1.1	8.1	0.11	0.8
7.8	2.0	7.1	0.09	0.6
37.8	2.2	34.7	0.56	2.5
7.4	0.9	6.8	0.08	0.5

2.2　穿透雨量与林外降雨量的关系

由穿透雨量和林外降雨量的散点图可以看出，穿透雨量随着林外降雨量的增大而增大，分别可用线性和二次多项式模型进行拟合。

线性方程：$y=0.906\ 0x+0.012\ 8$
$(R^2=0.999\ 5,\ n=45)$

二次多项式方程：$y=0.001\ 1x^2+0.865\ 0x+0.214$　$(R^2=0.999\ 7,\ n=45)$

式中：y——穿透雨量；x——林外降雨量。

二次多项式方程的决定系数稍大于直线方程，且二次项系数很小，因此两类方程的图像基本重合，两类方程均表示穿透雨量随着林外降雨量的增大而增加，但描述的意义却完全不同，直线方程表示二者呈正比例关系，增长趋势始终一致；二次多项式方程（二次项系数为正数）表示穿透雨量随林外降雨量的增加其增加趋势逐渐加快。在实际降雨过程中，降雨开始的同时林冠枝叶也随之开始截留降雨，因此降雨初期穿透雨量随林外降雨量增大而增加的趋势较为缓慢，当冠层截留的降雨达到饱和后，穿透雨量随林外降雨量的增大而增加的更快。对两类方程求导，直线方程得到的是一个常数，表示穿透率始终不变，这显然与实际情况不符；二次多项式方程得到的是一个函数，说明穿透率随林外降雨量的增加而增大。基于此，用二次多项式表示穿透雨量与林外降雨量的关系更为切合实际。

已有研究认为[11]关于刺槐林的穿透雨量和林外降雨量的关系，在降雨量较小的情况下用直线方程拟合比较近似，而在降雨量较大的情况下用二次多项式表达结果更佳。但在本试验中对比直线和二次多项式统计模型发现，二次多项式模型比直线模型具有更高的拟合度，更能准确表达穿透雨量和林外降雨量两者之间的关系。

2.3　树干径流量与林外降雨量的关系

有研究认为[12-13]树干径流量与林外降雨量为直线正相关关系，但亦有研究认为两者呈二次多项式关系[11]。本研究将两者的关系分别用直线和二次多项式表示，进行比较分析。

直线方程：$y=0.016\ 6x-0.042\ 1$
$(R^2=0.994\ 2,\ n=37)$

二次多项式方程：$y=-0.000\ 1x^2+0.022\ 4x-0.079\ 7$　$(R^2=0.999\ 9,\ n=37)$

式中：y——树干径流量；x——林外降雨量。

两类方程的决定系数均在 0.99 以上，且二次多项式方程的决定系数大于直线方程。降雨过程中发生树干径流的实际情况与穿透雨量类似，干流产生前果树树冠枝叶首先截留吸附降雨，只有当树冠的截留吸附达到一定的程度后，后续的降雨才转化为穿透雨和干流。因此降雨初期，树干径流随林外降雨的增大而增加的趋势是较为缓和的；随着果树树冠截留吸附逐渐饱和，树冠将更多的雨水转化为树干径流，此时，干流将随着林外降雨量的增大而增加的更快。拟合方程中，虽然二次多项式方程的决定系数更大，但其二次项系数为负数，其表达的意义正好与降雨过程中的实际情况相反；直线方程表示两者呈正相关关系，虽然与实际情况稍有差异，但是在降雨的中后期，却优于二次多项式方程。所以直线关系式可以代替二次多项式方程，近似表达树干径流量与林外降雨量两者之间的关系。

2.4　截留量与林外降雨量的关系

国内外对于林冠截留机制的统计模型有多种，其中对数模型得到较广泛的认可，认为在一定的雨强下，截留量 I 与降雨量 P 的关系为：$I=a+b\ln P$；也有研究认为其关系为：$I=aP^b$[14-15]。董世仁等[16]认为油松林冠截留量与降雨量的关系在低雨量区以幂函数表达较好，在高雨量区对数函数与实测值更为接近。本研究尝试用多种常用函数对苹果树林冠截留量与林外降雨量关系进行拟合。拟合结果表明，以三次多项式的拟合程度最高（图 1）。

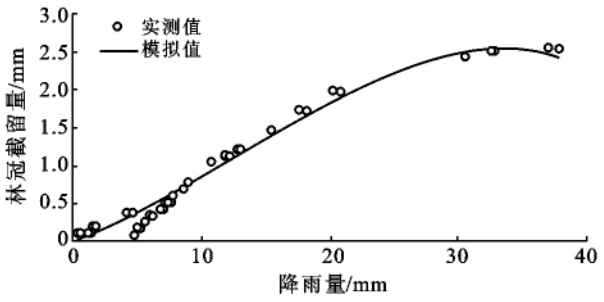


图 1　研究区截留量与林外降雨量的关系

$$y=-0.000\ 1x^3+0.004\ 5x^2+0.048\ 6x+0.001\ 9 \quad (R^2=0.985\ 1,\ n=45)$$

式中：y——林冠截留量；x——林外降雨量。

各关系表达式的系数差别较大，可以推测出统计模型与林冠结构特征和降雨强度有密切关系。

3 结 论

(1) 研究区苹果林地中，穿透雨量、树干径流量、林冠截留量分别占大气降雨量的 75%～97%，0.2%～1.6%，2% ～ 25%。果树的林冠截留作用使大气降雨的 75%～97%最终输入林地土壤，2%～25%的降雨以蒸发形式返回大气，同时果树树干周围土壤比其它林地多得到 0.2%～1.6%的降水补给。果树冠层不仅对输入林分的大气降雨进行了分配，而且对林地接收的降雨量进行了再分配。

(2) 苹果林地冠层穿透雨量与林外降雨量的关系用二次多项式表达比较切合实际，更能准确表达两者之间的关系。

(3) 苹果林地树干径流量与林外降雨量的关系可以近似利用直线方程表示。

(4) 相比较之下，果树林冠截留量与林外降雨量的关系可用三次多项式表达，该方程与实测值的拟合程度最高。

[参 考 文 献]

[1] Bigelow S W. Evapotranspiration modelled from stands of three broad-leaved tropical trees in Costa Rica[J]. Hydrological Sciences Journal, 2001, 15 (14): 2779-2796.

[2] 卢俊峰，马钦彦，刘世海，等. 北京密云油松人工林林冠降水截留特征研究[J]. 北京林业大学学报，2005，27(2)：129-132.

[3] 张志强，王礼先，王盛萍. 中国森林水文研究进展[J]. 中国水土保持科学，2004，2(2)：69-73.

[4] 康绍忠，刘晓明，熊云章. 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京：水利电力出版社，1994.

[5] 王志安，裴铁，金昌杰，等. 长白山阔叶红松林降雨截留量的估算[J]. 应用生态学报，2006，17(8)：1403-1407.

[6] 张义，谢永生. 不同覆盖措施下苹果园土壤水文差异[J]. 草业学报，2011，20(2)：85-92.

[7] 张义，谢永生，郝明德. 黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析[J]. 土壤，2011，43(2)：293-298.

[8] 何福红，蒋卫国，黄明斌. 黄土高原沟壑区苹果基地退果还耕的生态水分效应[J]. 地理研究，2010，29(10)：1863-1869.

[9] 李玉山，史竹叶，张效中，等. 长武王东沟小流域土壤墒情影响因素与分布特征[J]. 水土保持通报，1990，10(6)：1-6.

[10] 李永宁，张宾兰，秦淑英，等. 郁闭度及其测定方法研究与应用[J]. 世界林业研究，2008，21(1)：40-46.

[11] 卫三平，王力，吴发启，等. 黄土丘陵沟壑区刺槐林冠的水文特征[J]. 南京林业大学学报：自然科学版，2008，32(1)：43-48.

[12] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(I)[J]. 西北林学院学报，2000，15(3)：1-7.

[13] 鲍文，包维楷，何丙辉，等. 森林生态系统对降水的分配与拦截效应[J]. 山地学报，2004，22(4)：483-491.

[14] WANG Yanhui, YU Pengtao, XU Deying, et al. A preliminary study on transformation of rainfall interception models and parameter's variation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1999, 20(6): 25-30.

[15] 刘世荣，温远光，王兵，等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京：中国林业出版社，1996.

[16] 董世仁，郭景唐，满荣洲，等. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留[J]. 北京林业大学学报，1987，9(1)：58-67.