

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0102

邢晓光,刘斌,刘凤婵,等.河北省太行山5种经济林枯落物及土壤水文效应[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):202-208.
XING X G, LIU B, LIU F C, et al. Research on hydrological effects of litter and soil of 5 economic forest kinds in Taihang Mountains in Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 202-208. (in Chinese)

河北省太行山5种经济林枯落物及土壤水文效应

邢晓光,刘斌,刘凤婵,王淮亮,张晨,皮昌道

(河北省水资源研究与水利技术试验推广中心,石家庄 050061)

摘要:为评价河北省太行山区经济林水源涵养功能,选择梯田栽植的苹果、核桃、樱桃、板栗、杏5种经济林,采用室内浸水法和环刀法等研究其林下枯落物和土壤的持水特性和持水效益,分析其水文效应。结果表明:枯落物蓄积量表现为杏(3.42 t/hm²)<樱桃(3.69 t/hm²)<苹果(4.07 t/hm²)<板栗(7.11 t/hm²)<核桃(8.28 t/hm²);板栗林下枯落物最大持水量(17.07 t/hm²)最大,枯落物的持水量与持水时间正相关呈对数函数关系,持水速率与持水时间呈幂函数关系;至于林下枯落物有效拦蓄量,板栗林最大(14.37 t/hm²)。5种经济林林下土壤容重均值在1.40~1.52 g/cm³,随深度增加而增大;土壤的最大持水量均值在856.01~946.41 t/hm²,其排序与总孔隙度一致,依次为苹果<核桃<樱桃<板栗<杏;有效持水量均值在185.82~329.03 t/hm²,排序与非毛管孔隙度一致,依次为樱桃<苹果<核桃<板栗<杏。

关键词:太行山;经济林;枯落物;土壤;水文效应

中图分类号:S715 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on hydrological effects of litter and soil of 5 economic forest kinds in Taihang Mountains in Hebei Province

XING Xiaoguang, LIU Bin, LIU Fengchan, WANG Huailiang, ZHANG Chen, PI Changdao

(Hebei Center of Water Resources Research and Hydrotechnical Experiment and Promotion, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: In order to evaluate the water conservation function of economic forests in Taihang Mountains of Hebei Province, we selected five kinds of economic forests (apple, walnut, cherry, chestnut and apricot) planted on terraces and studied the water-holding characteristics and benefits of litter and soil in the forests by indoor immersion method and cutting-ring method. Then we analyzed their hydrological effects. The results showed that: The accumulative volume of the litter was as follows: walnut (8.28 t/hm²)>chestnut (7.11 t/hm²)>apple (4.07 t/hm²)>cherry (3.69 t/hm²)>apricot (3.42 t/hm²). Chestnut forest litter had the largest water holding capacity (17.07 t/hm²). There was a logarithmic relationship between the water holding capacity and water holding time of the litter, and a power function relationship between water holding rate and water holding time. The effective interception capacity of litter was the largest in chestnut forest (14.37 t/hm²). Soil bulk density increased with depth. The average soil bulk density of the five economic forests ranged from 1.40 to 1.52 g/cm³. The average maximum water holding capacity of soil in the five economic forests ranged from 856.01 to 946.41 t/hm². The sequence from low to high was: apple<walnut<cherry<chestnut<apricot, consistent with that of total porosity. The average effective water holding capacity ranged from 185.82 to 329.03 t/hm²; the sequence from low to high was: cherry<apple<walnut<chestnut<apricot,

收稿日期:2019-03-19 修回日期:2019-05-20 网络出版时间:2019-05-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190523.1618.014.html>

基金项目:河北省水利科技推广项目(2016-016)

作者简介:邢晓光(1977—),男,河北无极人,高级工程师,主要从事水土保持、水资源保护方面研究。E-mail:403770318@qq.com

consistent with that of non-capillary porosity.

Key words: Taihang Mountain; economic forest; forest litters; soil; hydrological effects

森林有着丰富的枯落物层,可以吸附截留降雨、减轻雨水冲击侵蚀土壤、减少土壤水分蒸发并增加入渗,具有明显的拦蓄地表径流以及改善土壤理化性质的功能,是森林水文效应的重要活动层,也是土壤有机质养分的重要来源之一^[1]。森林土壤是其水文作用的另一重要活动层,大气降水进入土壤后,一部分通过植物蒸腾和地面蒸发回归大气,一部分则贮存在土壤中或下渗,从而体现出森林水源涵养的功能^[2]。国内外许多学者在不同区域内,对不同森林类型林下枯落物和土壤的水文效应做过大量研究,主要在枯落物的蓄积量、持水性能和影响地表径流,以及土壤孔隙度和土壤容重等土壤物理性质,非毛管孔隙度对于储存林地降水和林地涵养水源能力等方面^[1-3]。

经济林是生态效益、经济效益和社会效益结合较好的林种,在山区水土保持和生态建设具有不可替代的作用。河北省太行山区经济林栽培品种多、面积大,在有些地区已经形成当地的特色产业,成为当地农民脱贫致富的主要途径。目前,对太行山丘陵陵区毛白杨林,侧柏林,杂木林和灌丛的枯落物及土壤水文效应有过对比研究^[1],经济林树种仅有板栗和苹果的枯落物的相关研究^[4],本次通过对河北省太行山区栽培的苹果(*malus pumila*)、核桃(*juglans regia*)、樱桃(*cerasus pseudocerasus*)、板栗(*castaneamollissima* BL.)、杏(*armeniaca vulgaris* Lam.) 5种经济林树种林下枯落物和土壤的持水过程和持水量进行研究,分析经济林生态水文效应,为评价经济林水源涵养功能提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于河北石家庄市西南部山区,该地区属典型的太行山中段东部低山区,山峦起伏、沟壑纵横,地势西高东低,海拔290~550 m。气候属于暖

温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,年平均气温12.6℃,极端最高温43.0℃,高温天气多出现在7月份,极端最低温-25.3℃,无霜期180 d左右,多年平均降水量570 mm,多集中在7—9月,占全年降水量的70%左右。土壤以褐土为主,兼有壤土、砂壤土或片麻岩石质土壤。自然植被类型以次生灌草丛为主,散生乔木,主要乔木树种有栓皮栎(*quercus variabilis*),臭椿(*ailanthus altissima*),栎树(*koelreuteria paniculata*)白蜡(*fraxinus chinensis* Roxb)等,灌草丛是酸枣(*ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow)、荆条(*vite negundo* L. var. *heterophylla*)、白羊草(*bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)、野谷草(*arundinella anomala*)等。

2 研究方法

2.1 样地调查

苹果、核桃、樱桃、杏林样地位于元氏县前仙乡西岭底村,板栗样地位于赞皇县嶂石岩乡三六沟村,地理坐标北纬37°32′~37°51′,东经114°08′~114°14′。2017年9月进行研究区样地调查,分别选取5种经济林的标准样地,每块面积20 m×20 m。主要调查并记录土地类型以及经济林生长基本情况。标准样地整地类型均为水平梯田,土层厚度在1.0~2.5 m,壤土,林龄相近,山体东南坡向。采用米尺等测定株行距、树高、冠幅、地径等,采用数码相机测定林分郁闭度。样地基本情况见表1。

2.2 样品采集

2017年11月在各经济林样地内典型地段设置3个0.5 m×0.5 m的小样方,测量枯落物厚度并取样带回。土壤耕作层约20 cm,以下为半熟化层,在各样地分别挖取2个土壤剖面,分别在0~20 cm耕作层,20~40 cm犁底层环刀取样带回。

表1 研究区5种经济林样地基本情况

Tab. 1 Basic facts of sample grounds of 5 economic forest kinds in the research area

林分	高程/m	坡向/°	林龄/a	株行距/m	树高/m	冠幅/m ²	地径/cm	郁闭度
苹果	287	120	20	4.0×4.0	3.5	14.6	22.9	0.82
核桃	290	110	15	4.0×4.0	3.5	12.5	17.5	0.80
杏	291	115	15	4.0×4.0	3.0	12.0	25.5	0.79
樱桃	290	110	14	4.0×4.0	3.5	19.6	27.1	0.85
板栗	490	130	15	4.0×4.0	3.0	10.5	18.5	0.75

2.3 测算方法

2.3.1 林下枯落物蓄积量测定

将带回实验室的枯落物称重并记录;置于干燥处通风处使其自然风干 3 d,烘箱 80 ℃ 恒温烘干 24 h 后,称量并记录烘干重,计算各树种的枯落物蓄积量。

2.3.2 林下枯落物有效拦蓄量估算

计算 5 种林分林下枯落物最大持水量和最大持水率,以及有效拦蓄量和有效拦蓄率,采用有效拦蓄量来估算枯落物对降雨的实际拦蓄效果^[1,5-6]。其中有效拦蓄量 W 计算公式为

$$W = (0.85R_m - R_0)M \quad (1)$$

式中: R_m 为最大持水率(%); R_0 为平均自然含水率(%); M 为枯落物蓄积量(t/hm^2)。

2.3.3 林下枯落物持水测定

林下枯落物持水量和吸水速率测定采用室内浸水法^[6-7],将枯落物装入尼龙网袋浸入水中,在 0.5、1、2、4、7、11、15、20、24 h 时称重,研究枯落物持水过程,SPSS 分析持水量、吸水速率以及其与持水时间的关系。

2.3.4 土壤物理性质测定

采用环刀法测定土壤容重,酒精燃烧法测定土壤含水量,根据所得指标计算土壤持水量^[1];环刀法测定田间持水量,计算土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度等指标。其中

$$\text{土壤总孔隙度} = (1 - \text{容重} / \text{密度}) \times 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{土壤毛管孔隙度}(\%) &= \text{土壤田间持水量}(\%) \times \text{容重} \\ \text{土壤非毛管孔隙度}(\%) &= \text{土壤总孔隙度}(\%) - \text{土壤毛管孔隙度}(\%) \end{aligned}$$

土壤最大持水量计算采用式(2)

$$R_{\max} = 10\ 000hp_i \quad (2)$$

式中: R_{\max} 为土壤最大持水量(t/hm^2); h 为土层厚度(m); p_i 为土壤总孔隙度(%)。

土壤有效持水量计算采用式(3)^[1-2,8]

$$R = 10\ 000hp \quad (3)$$

式中: R 为土壤有效持水量(t/hm^2); h 为土层厚度(m); p 为土壤非毛管孔隙度(%)。

3 结果与分析

3.1 枯落物蓄积量及分析

本次未采集到分解层和半分解层,仅采集到未分解层。5 种经济林下枯落物蓄积量依次为:杏($3.42 t/hm^2$)<樱桃($3.69 t/hm^2$)<苹果($4.07 t/hm^2$)<板栗($7.11 t/hm^2$)<核桃($8.28 t/hm^2$),不同林分林下枯落物蓄积量差别较大,具体见表 2。林下枯落物的储量直接受森林的生产能力和健康程度的影响^[9],并与森林立地状况、林分类型和生长状况有关^[10],本次研究表明枯落物蓄积量主要受经济林种类及郁闭度的影响:核桃及板栗叶片宽大,生长量大,其枯落物量明显大于其它树种;相比树势较弱的杏,樱桃和苹果有更大的郁闭度,因此枯落物储量较大。

表 2 5 种经济林分枯落物的蓄积量、最大持水量和有效拦蓄量

Tab. 2 Litter volume, maximum water holding capacity, and effective interception capacity of 5 economic forests

林分类型	蓄积量/($t \cdot hm^2$)	最大持水率/%	最大持水量/($t \cdot hm^2$)	自然含水率/%	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/($t \cdot hm^2$)
苹果	4.07	296.22	11.61	10.78	241.01	9.81
核桃	8.28	190.93	14.75	12.69	149.60	12.38
杏	3.42	259.75	8.56	9.88	210.91	7.22
樱桃	3.69	287.44	10.21	10.54	233.78	8.62
板栗	7.11	253.69	17.07	13.67	201.97	14.37

3.2 枯落物的水文效应及分析

3.2.1 最大持水量及持水率

枯落物最大持水量和持水率能很好地反映森林水源涵养和水土保持能力,常作为评价森林水文效应的重要指标^[11]。研究样地枯落物最大持水量和持水率变化范围较大,其中最大持水量排序依次为杏($8.56 t/hm^2$)<樱桃($10.21 t/hm^2$)<苹果($11.61 t/hm^2$)<核桃($14.75 t/hm^2$)<板栗($17.07 t/hm^2$);最大持水率排序依次为核桃(190.93%)<板栗(253.69%)<杏(259.75%)<

樱桃(287.44%)<苹果(296.22%),详见表 2。5 种林分枯落物最大持水量和最大持水率排序顺序并不相同,这是因为最大持水率可能主要受枯落物叶片结构等方面的影响,而最大持水量与枯落物蓄积量直接相关^[7,12]。

3.2.2 有效拦蓄量和拦蓄率

一般情况下,枯落物最大持水率仅反映枯落物层持水能力,而没有考虑到其雨前的自然含水率,因此估算的降雨拦蓄能力偏高,不能真实反映对降水的拦蓄效果^[13],因而采用有效拦蓄量指标更为合理。由表 2 可见,几种经济林枯落物有效拦蓄量排

序与最大持水量一致,依次为杏(7.22 t/hm²)<樱桃(8.62 t/hm²)<苹果(9.81 t/hm²)<核桃(12.38 t/hm²)<板栗(14.37 t/hm²)。有效拦蓄量最大的板栗林,相当于一次拦蓄 1.44 mm 降雨,最低的杏林相当于一次拦蓄 0.72 mm 降雨。有效拦蓄率与最大持水率排序一致,依次为核桃(149.60%)<板栗(201.97%)<杏(210.91%)<樱桃(233.78%)<苹果(241.01%)。

3.2.3 持水过程分析

枯落物持水量与吸水速率是反映其持水过程的 2 个重要指标^[11],研究表明,5 种林分的枯落物持水过程大致相似,其持水量随浸水时间的延长而增加,且在最开始浸水 2 h 内,持水量增加速度最大,2 h 后则持水量增幅越来越小而逐渐趋于稳定,在其浸水 12 h 后基本达到了饱和,见图 1。对 5 种林分枯

落物试验时段内的持水量与浸水时间进行回归分析,得出关系式为 $Q=a\ln(t)+b, R>0.980$,其中 Q 为枯落物持水量(g/Kg), t 为浸水时间(h), a 为方程系数, b 为方程常数项。不同林分枯落物持水量与浸水时间回归方程见表 3。

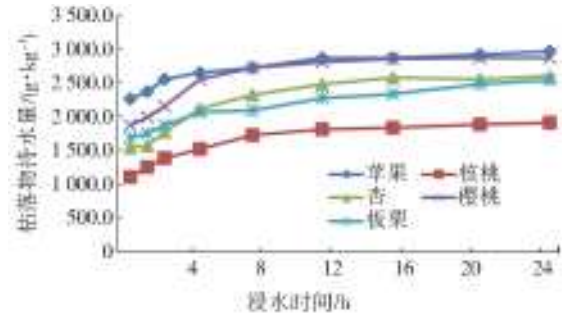


图 1 5 种经济林枯落物浸水时间和持水量的关系
Fig. 1 Relationship between immersion time and holding capacity of 5 economic forest litters

表 3 5 种经济林枯落物的持水量、吸水速率与浸水时间的关系

Tab. 3 Relationship of water holding capacity and water absorption rate of 5 economic forest litters with immersion time

林分类型	持水量与浸水时间关系		吸水速率与浸水时间关系	
	回归方程	相关系数 R	回归方程	相关系数 R
苹果	$Q=181.3\ln(t)+2393.6$	0.996	$V=2392.1t-0.931$	0.999
核桃	$Q=215.3\ln(t)+1254.0$	0.995	$V=1249.8t-0.857$	0.999
杏	$Q=311.7\ln(t)+1664.5$	0.985	$V=1660.3t-0.847$	0.999
樱桃	$Q=289.4\ln(t)+2052.4$	0.980	$V=2044.4t-0.878$	0.999
板栗	$Q=219.9\ln(t)+1766.2$	0.981	$V=1770.0t-0.894$	0.999

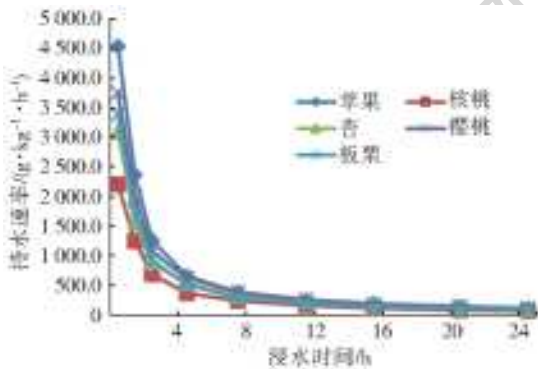


图 2 5 种经济林分枯落物吸水速率与浸水时间的关系
Fig. 2 Relationship between water absorption rate and immersion time of 5 economic forest litters

枯落物从风干状态浸入水中后,其表面水势差较大,因此吸水速率高,1 h 之后吸水速率急剧下降,至浸入水中 4 h 左右后,下降速度明显减缓,最终吸水速率趋于 0^[6,12]。随浸泡时间的延长,枯落物持水量逐渐接近其最大持水量,即趋于饱和,其持水量增长速度也随之减缓,各林分枯落物吸水速率也趋向一致^[2,12]。回归分析表明,5 种林分枯落物吸水速率与浸水时间之间呈指数关系(表 3),拟合的方程式为 $V=kt^n, R>0.999$,其中 V 为枯落物的

吸水速率[g/(kg·h)]; n 为指数; k 为方程系数; t 为浸水时间(h)。

3.3 土壤的水文效应及分析

3.3.1 土壤容重和孔隙度

土壤是森林养分和水分的主要载体,对水循环有着重要的作用,有着养分、水分储蓄库之称^[14],土壤的物理性状包括土壤容重及孔隙度等指标。其中土壤容重大小反映了土壤的密实程度,由土壤孔隙和固体数量决定,土壤容重大,表明土壤密实,容重小则反映土壤在结构上疏松多孔,透水通气性较好,利于植物根系生长^[2,12]。由表 4 可见,5 种经济林 0~40 cm 土壤深度内,土壤容重均值范围在 1.40~1.52 g/cm³,随土层深度的增加土壤有机质含量逐渐减少,土壤容重均随着土层深度增加而增大,土壤团聚性降低,表现出土壤结构也越来越密实^[7-8]。

土壤孔隙度由总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度等组成,土壤孔隙度的组成直接影响土壤通气透水性,因此直接反映了土壤的持水和水源涵养能力,毛管孔隙度和非毛管孔隙度对土壤中水、气、

肥、热等发挥着不同的调节功能,进而影响了植物根系生长^[15-16]。研究表明,土壤总孔隙度均值依次为苹果(42.80%)<核桃(42.90%)<樱桃(43.12%)<板栗(44.49%)<杏(47.32%),且随土壤深度的增加而减小(表 4)。毛管孔隙常称为土壤持水孔隙,毛管孔隙度反映了土壤吸持水分用于维持植物生长发育的能力^[8,17],其均值表现为核桃(29.24%)<板栗(30.33%)<杏(30.87%)<苹果(31.40%)<樱

桃(33.83%)。5 种经济林的毛管孔隙度排序可能也与该种经济林的田间耕作管理精细度关,由于樱桃经济价值相对较高,田间管理精细,且根系较浅,表现出更大的毛管孔隙度,而非毛管孔隙度相对较小。非毛管孔隙度均值表现为樱桃(9.29%)<苹果(11.40%)<核桃(13.66%)<板栗(14.17%)<杏(16.45%),排序也反映了各林分立地的土质情况稍有差异。

表 4 5 种经济林分土壤物理性质
Tab. 4 Soil physical properties of 5 economic stands

林分类型	土层厚度/ cm	土壤容重/ (g · cm ⁻³)	总孔隙度/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙度/ %	最大持水量/ (t · hm ⁻²)	有效持水量/ (t · hm ⁻²)
苹果	0~20	1.49	43.66	30.93	12.73	873.13	254.56
	20~40	1.54	41.94	31.87	10.08	838.88	201.51
	均值	1.52	42.80	31.40	11.40	856.01	228.04
核桃	0~20	1.48	44.22	28.56	15.66	884.42	313.13
	20~40	1.55	41.57	29.92	11.65	831.49	233.10
	均值	1.51	42.90	29.24	13.66	857.95	273.11
杏	0~20	1.36	48.59	30.13	18.46	971.80	369.29
	20~40	1.43	46.05	31.61	14.44	921.02	288.76
	均值	1.40	47.32	30.87	16.45	946.41	329.03
樱桃	0~20	1.49	43.90	33.36	10.54	878.04	210.77
	20~40	1.53	42.34	34.29	8.04	846.75	160.87
	均值	1.51	43.12	33.83	9.29	862.39	185.82
板栗	0~20	1.43	45.97	29.52	16.45	919.36	328.95
	20~40	1.51	43.02	31.13	11.89	860.35	237.70
	均值	1.47	44.49	30.33	14.17	889.85	283.33

3.3.2 土壤持水能力

土壤最大持水量受总孔隙度的影响,总孔隙度越大土壤能吸纳并滞留更多水分。由表 4 可见,5 种经济林分土壤最大持水量均值依次为苹果(856.01 t/hm²)<核桃(857.95 t/hm²)<樱桃(862.39 t/hm²)<板栗(889.85 t/hm²)<杏(946.41 t/hm²),排序与总孔隙度均值一致。土壤的有效持水量是与非毛管孔隙度密切相关^[18],非毛管孔隙贮蓄水又称土壤有效持水,是评价林地涵养水源的重要指标之一,这是因为非毛管孔隙更有利于地表水转化为土壤水或土壤径流和地下水^[19],非毛管孔隙越大,土壤吸收降水越快,由于水分主要受重力作用,能够及时下渗,促进了土壤有效持水能力的发挥^[20]。有效持水量均值排序依次为樱桃(185.82 t/hm²)<苹果(228.04 t/hm²)<核桃(273.11 t/hm²)<板栗(283.33 t/hm²)<杏(329.03 t/hm²)。

4 结 论

(1)太行山区 5 种经济林林下枯落物的蓄积量差别较大,排序依次为杏(3.42 t/hm²)<樱桃(3.69 t/hm²)<苹果(4.07 t/hm²)<板栗(7.11 t/hm²)<核桃(8.28 t/hm²),主要受经济林品种以及郁闭度的影响。

(2)林下枯落物最大持水量范围在 8.56~17.07 t/hm²,排序为杏<樱桃<苹果<核桃<板栗;而最大持水率范围在 190.93%~296.22%,排序为:核桃<板栗<杏<樱桃<苹果;各林分枯落物有效拦蓄率范围在 241.01%~149.60%,与最大持水率排序一致;有效拦蓄量变动范围在 14.37~7.22 t/hm²,与最大持水量排序一致,5 种经济林枯落物表现出较大的有效拦蓄降雨的优势,有效拦蓄量最大的是板栗林。

(3)5 种林分的枯落物持水量与浸水时间呈正相关,存在关系式 $Q = a \ln(t) + b$,且持水过程大致

相似;各林分枯落物吸水速率趋向一致,持水速率与浸水时间存在关系式 $V=kt^n$ 。

(4)林下土壤容重均随着土层深度增加而增大,总孔隙度均值排序为苹果(42.80%)<核桃(42.90%)<樱桃(43.12%)<板栗(44.49%)<杏(47.32%),且随土壤深度的增加而减小。毛管孔隙度均值表现为核桃(29.24%)<板栗(30.33%)<杏(30.87%)<苹果(31.40%)<樱桃(33.83%),其排序可能与田间管理的精细度有关。非毛管孔隙度均值表现为樱桃(9.29%)<苹果(11.40%)<核桃(13.66%)<板栗(14.17%)<杏(16.45%),反映各林地土质稍有差异。

(5)5种经济林分土壤最大持水量均值在856.01~946.41 t/hm²,排序与总孔隙度均值一致,反映了经济林的较强的水源涵养能力;有效持水量均值在185.82~329.03 t/hm²,排序与非毛管孔隙度均值一致。

参考文献(References):

[1] 陈倩,周志立,史琛媛,等.河北太行山丘陵区不同林分类型枯落物与土壤持水效益[J].水土保持学报,2015,29(5):206-211.(CHEN Q,ZHOU Z L,SHI C Y,et al.Litter and soil water-holding capacity of different typical forests in hilly region of Taihang Mountains in Hebei Province[J].Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(5):206-211.(in Chinese))DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2015.05.038.

[2] 陈波,孟成生,赵耀新,等.冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(3):216-221.(CHEN B,MENG C S,ZHAO Y X,et al.Hydrological effects of forest litters and soil of larix principis-rupprechtii plantations in the altitudes of north mountain of Hebei[J].Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(3):216-221.(in Chinese))DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2012.03.056.

[3] 宣立辉,康凡,谷建才,等.冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J].水土保持研究,2018,25(4):86-91.(XUAN L H,KANG F,GU J C,et al.Hydrological effects of litter and soil layers in typical stands of north Hebei[J].Research of Soil and Water Conservation,2018,25(4):86-91.(in Chinese))DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2018.04.012.

[4] 庞梦丽,孙明阳,王明远,等.河北太行山典型水土保持经济林枯落物持水特性[J].水土保持研究,2017,24(6):200-204.(PANG M L,SUN M Y,WANG M Y,et al.Litter water-holding capacity of economic forest for soil and water conservation in Taihang Mountain of

Hebei Province[J].Research of Soil and Water Conservation,2017,24(6):200-204.(in Chinese))DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2017.06.029.

[5] 张振明,余新晓,牛键值,等.不同林分枯落物层的水文生态功能[J].水土保持学报,2005,19(3):139-143.(ZHANG Z M,YU X X,NIU J Z,et al.Ecohydrological functions of litter on different forest stands[J].Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(3):139-143.(in Chinese))DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2005.03.034.

[6] 刘斌,鲁绍伟,李少宁,等.北京西山6种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2015,29(4):73-78,137.(LIU B,LU S W,LI S N,et al.Hydrological effects of litter and soil of six natural forests in Xishan Mountainous area of Beijing[J].Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(4):73-78,137.(in Chinese))DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2015.04.015.

[7] 陈波,杨新兵,赵心苗,等.冀北山地6种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(2):196-201.(CHEN B,YANG X B,ZHAO X M,et al.Hydrological effects of six natural pure forests litters and soil in northern Mountain of Hebei Province[J].Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(2):196-201.(in Chinese))DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2012.02.044.

[8] 胡静霞,杨新兵,朱辰光,等.冀西北地区4种纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持研究,2017,24(4):304-310.(HU J X,YANG X B,ZHU C G,et al.Hydrological effects of litter in four pure rests and soils in Northwest of Hebei Province[J].Research of Soil and Water Conservation,2017,24(4):304-310.(in Chinese))DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2017.04.048.

[9] 梁文俊,丁国栋,周美思,等.冀北山地油松和落叶松林下枯落物的水文效应[J].水土保持学报,2012,32(4):71-74.(LIANG W J,DING G D,ZHOU M S,et al.Hydrological effects of pinustabulae formis and larix-principis forest litters in North Mountain of Hebei Province[J].Journal of Soil and Water Conservation,2012,32(4):71-74.(in Chinese))DOI:10.13961/j.cnki.stbetb.2012.04.063.

[10] 于小文,宋小帅,康峰峰,等.辽河源典型森林群落下枯落物的水文特性[J].水土保持通报,2014,34(4):65-69,75.(YU X W,SONG X S,KANG F F,et al.Litter hydrological characteristics of typical forest communities in Liaoheyuan nature reserve[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2014,34(4):65-69,75.(in Chinese))DOI:10.13961/j.cnki.stbetb.2014.04.026.

[11] 赵雨森,韩春华,赵宏光,等.阿什河上游小流域主要

- 林分类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 203-208. (ZHAO Y S, HAN C H, ZHAO H G, et al. Soil hydrologic functions of main forest types in Ashi River upstream watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 203-208. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stb-cxb. 2012. 02. 045.
- [12] 卢振启, 黄秋娟, 杨新兵. 河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 112-116. (LU Z Q, HUANG Q X, YANG X B. Research on hydrological effects of forest litters and soil of pinustabuli from is plantations in the different altitudes of Wuling Mountains in Hebei [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 112-116. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stb-cxb. 2014. 01. 003.
- [13] 韩雪成, 赵雨森, 辛颖, 等. 大兴安岭北部火烧迹地兴安落叶松人工林土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 183-188. (HAN X C, ZHAO Y S, XIN Y, et al. Soil hydrology characteristics of larixgmelinii plantation in burned forestland in the north of Greater Xingan Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 183-188. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stb-cxb. 2012. 04. 53.
- [14] 吴迪, 辛学兵, 赵明扬, 等. 北京九龙山不同林分枯落物及土壤水文效应[J]. 林业科学研究, 2014, 27(3): 417-422. (WU D, XIN X B, ZHAO M Y, et al. Hydrological effects of litters and soil under different forests in Jiulongshan of Beijing[J]. Forest Research, 2014, 27(3): 417-422. (in Chinese)) DOI: 10. 13275/j. cnki. lykxyj. 2014. 03. 020.
- [15] 饶良懿, 朱金兆, 毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 33-37. (RAO L Y, ZHU J Z, BI H X, Hydrological effects of forest litters and soil in the Simian Mountain of Chongqing City[J]. Journal of Beijing Forestry University. 2005, 27(1): 33-37. (in Chinese)) DOI: 10. 13332/j. 1000-1522. 2005. 01. 007.
- [16] 田超, 杨新兵, 李军, 等. 冀北山地阴坡枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 97-103. (TIAN C, YANG X B, LI J, et al. Hydrological effects of forest litters and soil in the slope of North Mountain of Hebei Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2): 97-103. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stb-cxb. 2011. 02. 056.
- [17] 吕刚, 曹小平, 卢慧, 等. 辽西海棠山森林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 203-208. (LYU G, CAO X P, LU H, et al. Study on water-holding capacity of forest litter and soil in haitang mountain of western Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 203-208. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stb-cxb. 2010. 03. 052.
- [18] 谢亚军, 谢永宏, 陈心胜, 等. 湿地土壤水源涵养功能研究进展[J]. 湿地科学, 2012, 10(1): 109-114. (XIE Y J, XIE Y H, CHEN X S, et al. Function of water conservation of wetland soil; A review[J]. Wetland Science, 2012, 10(1): 109-114. (in Chinese)) DOI: 10. 13248/j. cnki. wetlandsci. 2012. 01. 012.
- [19] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529-534. (ZHANG B, LI W H, XIE G D, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 529-534. (in Chinese))
- [20] 罗歆, 代数, 何丙辉, 等. 缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 64-69. (LUO X, DAI S, HE B H, et al. Investigation of nutrients and physical properties of the soil under different types of forest vegetation in Jinyun Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1): 64-69. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stb-cxb. 2011. 01. 053.