

网络出版时间:2014-04-25 15:48

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.007

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.007.html>

晋西黄土丘陵沟壑区主要人工林枯落物水文特性研究

张 东^{1,2}, 邵社刚^{1,2}, 赵 辉³

(1 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088; 2 公路交通环境保护技术交通行业重点实验室, 北京 100088;

3 湖北省水利水电科学研究院, 湖北 武汉 430070)

[摘 要] 【目的】研究晋西黄土丘陵沟壑区白榆、侧柏、油松 3 个主要树种人工林林下枯落物的水文特性。【方法】在山西省吕梁地区方山县峪口镇土桥沟流域, 以白榆、侧柏、油松 3 个主要树种人工林为研究对象, 在每个林分标准样地内选取 3 个枯落物样方(30 cm×30 cm)采集枯落物, 进行浸泡试验和烘干试验, 分别测定不同林分枯落物的总蓄积量、吸水速率、持水量和失水速率等特性指标。【结果】3 个树种人工林枯落物总蓄积量由大到小依次为侧柏林(40.44 t/hm²)>油松林(21.33 t/hm²)>白榆林(6.82 t/hm²), 枯落物吸水速率由大到小依次是白榆林>油松林>侧柏林; 枯落物最大持水量为白榆林(32.24 t/hm²)>侧柏林(30.72 t/hm²)>油松林(28.83 t/hm²), 失水速率由高到低依次为侧柏林>油松林>白榆林。【结论】白榆林林地枯落物在储存水分以及增强林木对水分利用等方面较油松林和侧柏林具有优势, 在增加土壤水分、涵养水源、防止水土流失等方面都有很好的生态效应。

[关键词] 黄土丘陵沟壑区; 枯落物; 水文特性

[中图分类号] S715

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)05-0097-05

Hydrological features of man-made forest litters in Hilly-gully Loess Region of Western Shanxi

ZHANG Dong^{1,2}, SHAO She-gang^{1,2}, ZHAO Hui³

(1 Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2 China Communications and Transportation Industry Key Laboratory of Environmental Technology, Beijing 100088, China;

3 Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: 【Objective】The study focused on hydrological features of litters in three types of man-made forests, *Ulmus pumila*, *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis*, in Hilly-gully Loess Region of Western Shanxi. 【Method】Three major species of the river basin in Yukou Station, Fangshan County, Shanxi Province were selected and three litters plots (30 cm×30 cm) were set in each plot. Total volume, water absorption rate, water capacity, and water loss rate of collected litter samples were measured through soaking and drying experiments. 【Result】Total litter storages of the three plantations were in an order of *Platycladus orientalis* (40.44 t/hm²)>*Pinus tabulaeformis* (21.33 t/hm²)>*Ulmus pumila* (6.82 t/hm²). Water absorption rates were *Ulmus pumila*>*Pinus tabulaeformis*>*Platycladus orientalis*. Water capacities were *Ulmus pumila* (32.24 t/hm²)>*Platycladus orientalis* (30.72 t/hm²)>*Pinus tabulaeformis* (28.83 t/hm²) and water loss rates were *Platycladus orientalis*>*Pinus tabulaeformis*>*Ulmus pumila*. 【Conclusion】The litters of *Ulmus pumila* were better in respective to water storage and capacity of water utilization than *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis*. The litters had good ecological effects to

〔收稿日期〕 2013-04-15

〔基金项目〕 交通运输部建设科技基金项目(201231836520)

〔作者简介〕 张 东(1986—), 男, 陕西商洛人, 工程师, 硕士, 主要从事水土保持、林业生态工程研究。

E-mail: dongcheng_1986@163.com

increase soil moisture and water conservation as well as prevent water loss and soil erosion.

Key words: Hilly-gully Loess Region;litters;hydrological features

枯落物具有涵养水源、保持水土、改善土壤结构的功能,是森林生态系统重要的组成部分^[1]。森林植被产生的大量枯枝落叶,堆积在地表,经过自然变化和微生物作用,形成一层像海绵一样的地被物,这些地被物具有强大的吸水能力和透水性,能够减少土壤的蒸发,阻延径流形成,防止水土流失,在森林植被的水土保持功能方面有着十分重要的作用^[2-4]。

目前,国内外许多学者在枯落物特性方面开展了大量研究,Hanks^[5]、Denmead^[6]、Choudhury^[7]、de Grandpre 等^[8]的研究结果表明,枯落物的蓄积量决定着枯落物对雨水的截留作用。林地枯落物的数量和堆积结构是影响地表径流产生的主导因子。张洪江等^[9]研究表明,针阔混交林林地枯落物的持水能力大于 2 种林木的纯林林地。随着对林地枯落物的深入认识,林地枯落物的功能和特性也逐渐成为研究森林生态系统生态效应的要点之一。

晋西黄土丘陵沟壑区属于干旱半干旱地区,区内植被稀少,水土流失严重,生态环境脆弱。多年来该地区营造了大量的水土保持林、农田防护林、生态公益林等多种人工林体系。研究表明,人工林在保土保墒方面发挥着重要作用^[10]。但目前,关于该地区人工林枯落物水文特性的研究较少,故本研究选取生长于晋西黄土丘陵沟壑区的白榆、油松和侧柏 3 种主要人工林为研究对象,测定其相关水文特性指标,以期为当地水土环境保护提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吕梁地区方山县峪口镇土桥沟流域,流域呈东西走向,地理坐标为北纬 37°35′~

37°36′,东经 110°02′~110°04′,平均海拔 1 200 m 左右,最高 1 446 m,最低 1 170 m。流域内地表植被稀疏,沟壑密布,山体陡峭且破碎,是典型的黄土高原丘陵沟壑侵蚀地貌。自 1985 年以来,该地区已成为山西省研究和推广径流林业的实验基地。

研究区属温带大陆季风性气候,冬春寒冷干燥,秋季凉爽少雨,仅夏季降雨集中,无霜期 140 d 左右。土壤为黄绵土,土层厚度在 50~100 m,pH 值为 8.0~8.4。据当地气象站资料统计:研究区年平均气温 7.3℃,多年平均降水量 416 mm,6—9 月份降水超过全年的 70%;多年平均水面蒸发量高达 1 857.7 mm,最大蒸发量出现在 4—6 月,表现出典型的北方严重春旱的特征。

试验区属森林草原灌丛植被区,区内乔木以人工林为主,主要有:白榆(*Ulmus pumila*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等树种的纯林以及混交林;林下灌木主要有:沙棘、黄刺玫、杠柳、文冠果、虎榛子和紫穗槐等;草本植物以菊科和禾本科为主。

本研究选取侧柏、白榆、油松 3 个主要树种的人工林作为研究对象,3 种林分的营造方式均为径流林整地,株行距均为 1.5 m×2 m,其中侧柏林的整地方式为集水区拍光处理。研究区样地基本特征如表 1 所示。

1.2 研究方法

在每个林分的标准样地内沿对角线选取 3 个枯落物样方,大小规格为 30 cm×30 cm,用钢板尺现场测量枯落物各分层(包括枯枝落叶层、未分解层、半分解层)的厚度,并采集样品,用塑料袋密封带回室内后迅速称质量,然后进行烘干并称质量,计算其自然含水率及蓄积量。

表 1 研究区样地的基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample plots

样地类型 Type	样地 面积/m ² Area	株行距/m Spacing	林龄/年 Tree age	海拔/m Altitude	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	坡度/(°) Slope	土壤类型 Soil texture
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	20×20	1.5×2	25	1 291	SW20°	上坡 Uphill	28	黄绵土 Loess soil
白榆 <i>Ulmus pumila</i>	20×20	1.5×2	25	1 228	SW40°	上坡 Uphill	24	黄绵土 Loess soil
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	20×20	1.5×2	25	1 271	SW10°	上坡 Uphill	10	黄绵土 Loess soil

按不同树种采集 30 cm×30 cm 原状枯落物,称质量后放入预先做好的细孔纱布袋内,在实验室内

进行浸泡试验,分别测定浸泡 10,20,30,40,50 min 及 1,1.5,2,3,4,6,8,12,16,24 h 后的质量变化,每

次浸泡后取出称质量,然后计算其湿质量与干质量的差值,该差值与浸水时间的比即为枯落物的吸水速率;将完全浸泡 24 h 的枯落物在 60~80 ℃ 条件下烘干,每隔一定时间称质量 1 次,其质量差值与烘干时间之比为失水速率。

2 结果与分析

2.1 不同林分枯落物的蓄积量

枯落物是森林枯落物层持水的载体,其蓄积量的大小和性质将直接影响枯落物层持水能力的高低,蓄积量越大、水分吸附性能越好,则持水量也会越大^[11]。因此,在评价森林水文生态功能的时候,枯落物蓄积量是研究的首要因素。不同类型的林分,枯枝落叶成分、枯落物堆砌方式、林下微生物活动的环境条件,以及水、热等条件的不同均会造成枯落物分解速度的差异,从而导致枯落物在一定时间

内的蓄积量出现较大差别。人工林植被林下枯落物蓄积量的大小与树种、树木生长年龄、林分营造结构、地被植物、气候因子以及人类活动的强弱有关。

根据样地调查结果(表 2)可知,林龄为 25 年的白榆林、侧柏林、油松林的林下枯落物总蓄积量分别为 6.82,40.44,21.33 t/hm²;3 个树种在相同的生长年限和近似相同的立地条件下,总蓄积量表现为侧柏林>油松林>白榆林。经分析,白榆是常绿阔叶树种,枯枝落叶易分解;而油松、侧柏属针叶树种,枯枝落叶表面被角质层包裹,且含有大量叶酸物质,不易被微生物分解,大大降低了其枯枝落叶的分解速度。同时,本研究在调查中发现,白榆林郁闭度较高,林下水热条件优于油松、侧柏林,微生物活动频繁,加速了白榆林下枯枝落叶的分解。这些综合因素造成侧柏林、油松林林下枯落物累积相对较多,而白榆林下枯落物累积较少的结果。

表 2 不同林分枯落物的蓄积量
Table 2 Litter volumes of different forests

林地类型 Type	样方 (30 cm×30 cm) 郁闭度 Crown density	厚度/cm Thickness	总蓄积量/ (t·hm ⁻²) Volume	自然 含水率/% Percentage	未分解层 Undecomposed		半分解层 Semi decomposed	
					厚度/mm Thickness	蓄积量/ (t·hm ⁻²) Volume	厚度/mm Thickness	蓄积量/ (t·hm ⁻²) Volume
白榆 <i>Ulmus pumila</i>	0.6	2.5	6.82	44.89	10	2.67	15	4.15
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.3	4.1	40.44	17.17	31	31.27	10	9.17
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.7	3.5	21.33	29.67	15	9.01	20	12.32

2.2 不同林分枯落物的吸水速率和持水量

2.2.1 吸水速率 森林枯落物在雨水降落至地表时首先将其拦截,然后通过吸附作用将雨水蓄积在枯落物层,这一拦截和蓄积雨水的特性,能够延长雨水入渗的时间,抑制土壤水分蒸发,直接提高土壤含水量^[12-13]。一定量枯落物在单位时间内吸附水分的

能力被称为枯落物的吸水速率,研究枯落物的吸水速率对评价森林对雨水的调蓄能力和持水过程具有重要意义。

本研究通过浸泡试验,测定了油松、侧柏、白榆 3 个树种林分的枯落物在不同时段的吸水速率,结果见图 1。

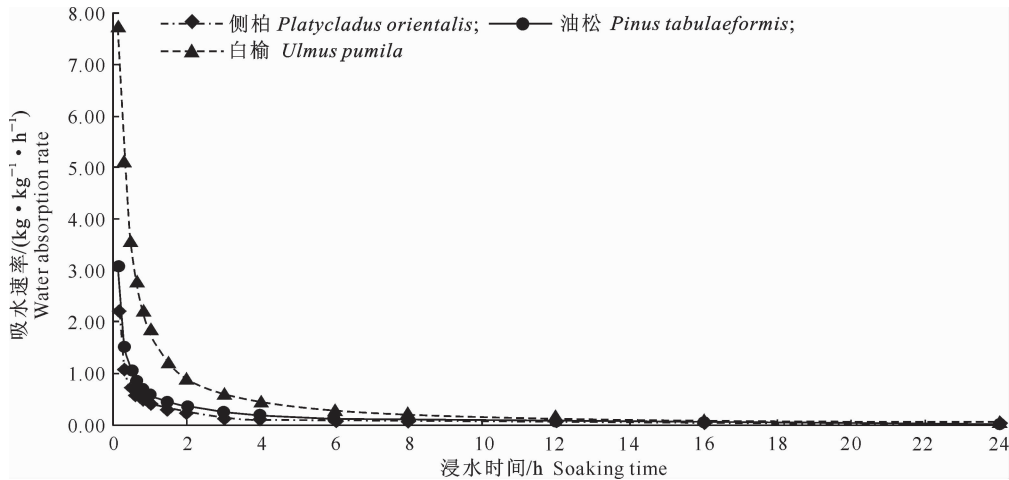


图 1 不同林分枯落物吸水速率与其浸水时间的关系
Fig.1 Relationship between water absorption rate and soaking time

图 1 显示,各树种林下枯落物吸水速率呈现相同的变化趋势,都是浸水前期吸水速率迅速降低,然

后降幅逐渐趋于缓慢。在浸水前期,枯落物吸水速率变化最大,尤其是在浸水 0~0.5 h,枯落物吸水速率迅速降低,在浸水 12 h 之后,枯落物吸水速率基本趋于稳定。枯落物处于风干状态时,由于枯枝落叶内含有大量的植物死细胞,表面与水之间的水势差较大,此时将枯落物浸入水中,吸水速率立即处于高位水平;而且枯落物中半分解的碎屑较多,导致其表面积之和比未分解的要大很多,所以吸水量比较大。随着浸水时间的延续,枯落物中吸附的水分逐渐增多,同枯落物外部水体的水势差慢慢减小,吸水速率也逐渐降低,当浸水时间达到 24 h 时,枯落物中的水分达到饱和,吸水速率趋近于零。

3 个树种林分的枯落物吸水速率由大到小依次是:白榆林>油松林>侧柏林(图 1)。说明在相同的降雨强度下,白榆林林下枯落物的吸水速率强于油松林和侧柏林。

2.2.2 持水量 森林枯落物可以增加林地土壤储水,使有限的降水资源能更大程度地被林木吸收利用。枯落物的持水量与其本身的组成结构、分解状况等有关。林地枯落物的持水能力多用于物质的最大持水量和最大持水率来表示,最大持水率为枯落物浸水 24 h 后的湿质量与其干质量之比;林地枯落物的持水量主要与林木的林龄、覆盖度和枯落物蓄积有关,同时还受落叶种类、堆积状态、分解程度、干湿状态和雨量大小、雨强等因素影响^[14]。

由表 3 可以看出,试验地 3 种树种人工林的枯落物最大持水量变动范围为 28.83~32.24 t/hm²,

其中白榆林的林地枯落物持水量最大,达到 32.24 t/hm²,侧柏林和油松林的林地枯落物最大持水量分别为 30.72 和 28.83 t/hm²;林地枯落物最大持水率变化范围为 175.96%~572.94%,顺序依次为白榆林>油松林>侧柏林。根据以上结果,白榆林的林下枯落物最大持水量和最大持水率均高于侧柏林和油松林,这是因为最大持水率与枯落物自身的生物量和组成结构、以及枯落物的分解程度有关。枯落物的分解程度越高,则半分解层枯落物量越大,枯落物层的持水能力也就越强。白榆林由于林分郁闭度高,林下植物种类多,林下水热条件较好,利于微生物生存,导致枯落物易于分解,林下枯落物半分解层较厚,故其枯落物最大持水量和最大持水率较高。而油松和侧柏林的枯枝落叶由于含有大量革质和油脂,不易被微生物分解,这可能是导致油松、侧柏林枯落物最大持水量和最大持水率较低的原因。

表 3 不同林分枯落物的最大持水量

Table 3 Water holding capacities of different forests		
林地类型 Type	最大持水量/ (t·hm ⁻²) Maximum water holding capacity	最大 持水率/% Percentage
白榆 <i>Ulmus pumila</i>	32.24	572.94
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	30.72	175.96
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	28.83	235.13

2.3 不同林分枯落物的失水速率

为全面衡量林地枯落物储存水分的能力,本研究对不同林分枯落物的失水速率进行了分析,结果见图 2。

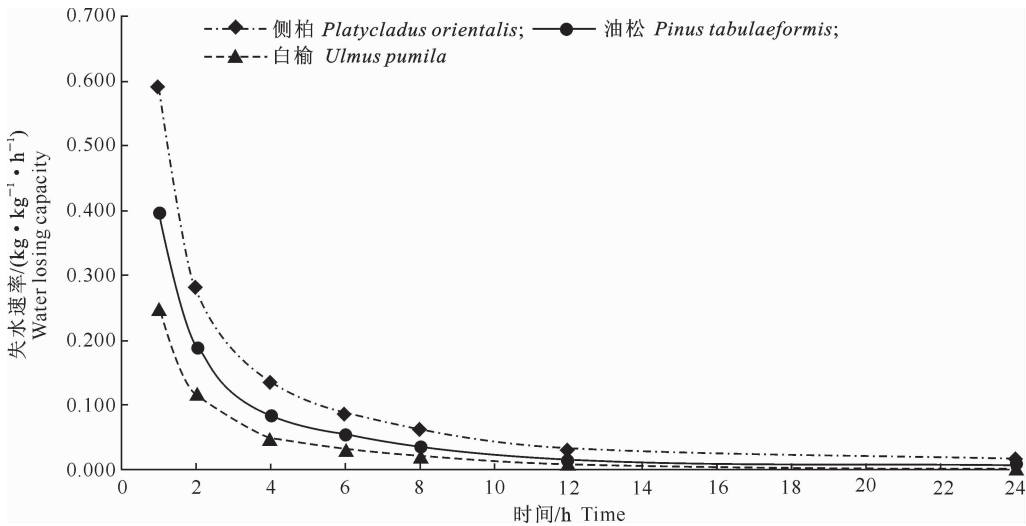


图 2 不同林分枯落物失水速率的变化

Fig.2 Changes of water losing capacities of different forests

森林枯落物的持水能力是整个森林生态系统水分循环中的重要一环,是反映林地枯落物水文特性

的重要指标^[15]。枯落物吸水速率和持水量越高,则能在最短时间内有效地含蓄降水,为土壤保湿保墒提供充足的水分;但是,如果枯落物仅是快速吸水然后又快速失水,那么枯落物含蓄的水分能够被植物有效利用的则相对减少,枯落物持水的综合水平也大大降低。由图 2 可以看出:林地枯落物失水速率在初期 1~2 h 迅速下降,之后随时间延长呈不断下降的趋势,但下降速度趋于缓慢,到 24 h 时趋于 0。由此可认为,降雨过程中,枯落物含蓄雨水,拦蓄降雨形成地表径流后,随着枯落物湿润程度的减小,失

水能力逐渐降低,直至达到枯落物自然含水量。

由图 2 还可以看出,3 种林分的失水速率均呈明显下降趋势,其中,侧柏林的枯落物失水速率下降幅度最大。表 4 反映了 3 种林分枯落物失水过程中失水速率(y)与时间(x)的线性变化特征,其中斜率绝对值最大的为侧柏林,其次为油松林,最小的是白榆林,失水速率由大到小依次是:侧柏林>油松林>白榆林,说明侧柏失水比油松和白榆快,这与图 2 中实测的结果一致。

表 4 不同林分枯落物累积失水过程的线性方程

Table 4 Regression equations for water losing capacity of litters from different forests

林地类型 Type	线性方程 Linear equation	R^2
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	$y = -0.055\ 2\ x + 0.331\ 6$	0.740 5
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	$y = -0.082\ 0\ x + 0.500\ 0$	0.750 0
白榆 <i>Ulmus pumila</i>	$y = -0.034\ 9\ x + 0.208\ 5$	0.740 6

3 结 论

1)试验地油松林、侧柏林、白榆林 3 种人工林枯落物蓄积量在 6.82~40.44 t/hm²,在近似相同的立地条件和生长年限下,总蓄积量表现为侧柏林>油松林>白榆林。

2)3 个树种林下枯落物吸水速率均呈现前期迅速下降,而后下降缓慢的趋势,吸水速率由大到小依次是:白榆林>油松林>侧柏林。白榆林的林地枯落物持水量最大,达 32.24 t/hm²,侧柏林和油松林的林地枯落物最大持水量分别为 30.72 和 28.83 t/hm²;白榆林林下枯落物的持水能力强于油松林和侧柏林。

3)3 个树种林下枯落物的失水速率在初期 1~2 h 内迅速下降,随后下降速度趋缓,到 24 h 时趋于 0。失水速率由大到小依次是:侧柏林>油松林>白榆林。总体来看,白榆林的林地枯落物在储存水分、增强林木对水分利用等方面较油松林和侧柏林具有优势,这对增加土壤水分、涵养水源、防止水土流失都有很好的生态效应。

[参考文献]

[1] 张振明,余新晓,牛健植,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 Water Conservation, 2005, 19(3): 139-143. (in Chinese)

[2] 杨承栋.森林土壤研究几个方面的进展[J].世界林业研究,1994,7(4):14-19.
Yang C D. Progress in several aspects of researches on forest

soils [J]. World Forestry Research, 1994, 7(4): 14-19. (in Chinese)

[3] 王国梁,刘国彬,侯喜禄.黄土高原丘陵沟壑区植被恢复重建后的物种多样性研究[J].山地学报,2002,20(2):182-187.
Wang G L, Liu G B, Hou X L. The research of species diversity after the vegetation restoration in Loess Hilly Region [J]. Journal of Mountain Research, 2002, 20(2): 182-187. (in Chinese)

[4] 张卫强,贺康宁,周毅,等.黄土半干旱区刺槐林地土壤蒸发特性研究[J].水土保持研究,2004,14(6):396-399.
Zhang W Q, He K N, Zhou Y, et al. Study on soil evaporation of the *Robinia pseudoacacia* forest land in semi-arid region of the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 14(6): 396-399. (in Chinese)

[5] Hanks R J. Yield and water-use relationship [M]//Taylor H M, Jordan Wayne R, Sinclair Thomas R. Limitations to efficient water use in crop production. New York: Inc. Madison WI, 1982:393-411.

[6] Denmead O T. Plant physiological methods for studying evapotranspiration; Problems of telling the forest from the trees [J]. Agric Water Manag, 1984, 8: 167-189.

[7] Choudhury B. Modeling the effect of weather condition and soil water potential on canopy temperature for corn [J]. Agric Meteorology, 1983, 29: 169-182.

[8] de Grandpre L, Bergeron Y. Diversity and stability of understorey communities following disturbance in the southern boreal forest [J]. Journal of Ecology, 1997, 85: 777-786.

[9] 张洪江,程金花,史玉虎,等.三峡库区 3 种林下枯落物储量及其持水特性[J].水土保持学报,2003,17(3):55-58.
Zhang H J, Cheng J H, Shi Y H, et al. Reserves and water capacity characteristics of three kinds of litter of Three Gorges Area [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(3): 55-58. (in Chinese)

[18]

Berry P M, Spink J, Foulkes M J, et al. The physiological basis of genotype oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Field Crops Research, 2010, 119: 365-373.

[19]

陈范骏, 米国华, 张福锁, 等. 华北区部分主栽玉米杂交种的氮效率分析 [J]. 玉米科学, 2003, 11(2): 78-82.
Chen F J, Mi G H, Zhang F S, et al. Nitrogen use efficiency in some of main maize hybrids grown in north China [J]. Journal of Maize Sciences, 2003, 11(2): 78-82. (in Chinese)

[20]

Zlatko S N, Zdenko R. Nitrogen utilization efficiency in canola cultivars at grain harvest [J]. Plant and Soil, 2006, 283: 299-307.

[21]

洪 娟, 徐芳森. 油菜氮高效种质的筛选及其生理机制的初步研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
Hong J, Xu F S. Screening of nitrogen efficient germplasm and preliminary study on its physiological mechanism in rapeseed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)

[22]

安 蓉, 曹兰芹, 杨 睿, 等. 盆栽条件下不同氮素利用效率油菜农艺性状的差异 [J]. 西北农业学报, 2013, 22(12): 23-29
An R, Cao L Q, Yang R, et al. Differences of agronomic traits among different rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes with varied nitrogen use efficiency in pot experiment [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinic, 2013, 22(12): 23-29. (in Chinese)

[23]

艾天成, 周治安, 李方敏, 等. 小麦等作物叶绿素速测方法研究 [J]. 甘肃农业科技, 2001(4): 16-18.
Ai T C, Zhou Z A, Li F M, et al. Rapid testing method for chlorophyll of wheat and other crops [J]. Gansu Agric Sci Tech, 2001(4): 16-18. (in Chinese)

[24]

Andersson A, Johansson E, Oscarson P. Nitrogen redistribution from the roots in post-anthesis plants of spring wheat [J]. Plant and Soil, 2005, 269: 321-332.

(上接第 101 页)

[10]

王 波, 张洪江, 杜士才, 等. 三峡库区天然次生林凋落物森林水文效应研究 [J]. 水土保持通报, 2009(3): 83-87.
Wang B, Zhang H J, Du S C, et al. Forest hydrological effects of litter layers under different natural secondary forest in Three Gorges Reservoir Area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009(3): 83-87. (in Chinese)

[11]

赵陟峰, 郭建斌, 赵廷宁, 等. 土桥沟流域不同林分枯落物的水文特性 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 14-17.
Zhao Z F, Guo J B, Zhao T N, et al. Hydrologic characteristics of litter under different forest types in Tuqiaogou Watershed [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 14-17. (in Chinese)

[12]

杨新民. 黄土高原灌木林地水分环境特性研究 [J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 77-89.
Yang X M. Study on the characteristics of water enviromental in shrubbery land of Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2001, 18(1): 77-89. (in Chinese)

[13]

魏天兴, 余新晓, 朱金兆, 等. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 185-189.
Wei T X, Yu X X, Zhu J Z, et al. Relationship between water supply and consumption of main planting tree species of protection forests in loess area of western Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(2): 185-189. (in Chinese)

[14]

李世荣. 大通高寒区退耕还林生态效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
Li S R. Studies on ecological effect of converting cropland to forest in Datong High-Cold Zone of Qinghai [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. (in Chinese)

[15]

张柏林. 刺槐人工林林地凋落物量和林下植物生物量与立地因素间相关关系的研究 [J]. 生态学杂志, 1991, 10(4): 13-16.
Zhang B L. Study on correlations between site factors and biomass of litterfall and undergrowth plant in black locust (*Robinia pseudoacacia*) stands [J]. Chinese Journal of Ecology, 1991, 10(4): 13-16. (in Chinese)