辽河源典型森林群落下枯落物的水文特性

于晓文，宋小帅，康峰峰，韩海荣

（北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083）

摘　要：以辽河源自然保护区典型森林群落为对象，对其下枯落物储量和持水量等水文特性进行了研究。结果表明：(1) 研究区枯落物总储量变化范围为 7.92～15.56 t/hm^2，60 a 林龄油松纯林储量最大，华北落叶松纯林最小；(2) 研究区最大持水率变化范围为 164.12%～333.06%，最大持水率大小排序为：杨桦混交林＞华北落叶松纯林＞50 a 油松纯林＞60 a 油松纯林＞40 a 油松纯林；(3) 研究区最大持水量变化范围为 21.31～38.13 t/hm^2，最大持水量大小依次为：杨桦混交林＞60 a 油松纯林＞50 a 油松纯林＞华北落叶松纯林＞40 a 油松纯林；(4) 对枯落物持水过程进行回归分析，各群落枯落物未分解层和半分解层持水量与浸水时间之间均服从对数函数回归关系(R＞0.87)，持水速率与浸泡时间之间均符合幂函数关系(R＞0.87)。

关键词：典型森林群落；枯落物；水文特性；辽河源自然保护区

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2014)04-0065-05　　**中图分类号**：S715

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.026

Litter Hydrological Characteristics of Typical Forest Communities in Liaoheyuan Nature Reserve

YU Xiao-wen, SONG Xiao-shuai, KANG Feng-feng, HAN Hai-rong

(*Key Lab. for Silviculture and Conservation of MOE, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: By taking typical forest communities in the Liaoheyuan Nature Reserve as an object, litter storage and water-holding were studed. The results show that: (1) The variation range of litter layer reserves was about 7.92～15.56 t/hm^2, the litter layer total storage capacity in the 60 a *Pinus tabulaeformis* was the largest, and *Larix kaempferi* was the least; (2) The largest water-holding rate was about 164.12%～333.06% and the order was *Populus davidiana*×*Betula platyphylla*＞*Larix kaempferi*＞*Pinus tabulaeformis*(50 a)＞*Pinus tabulaeformis*(60 a)＞*Pinus tabulaeformis*(40 a); (3) The maximum water-holding rate ranged from 21.31 t/hm^2 to 38.13 t/hm^2 and the order was *Populus davidiana*×*Betula platyphyll*＞*Pinus tabulaeformis*(60 a)＞*Pinus tabulaeformis*(50 a)＞*Larix kaempferi*＞*Pinu stabulaeformis*(40 a); (4) By statistic analyse, the equation between water-holding capacity of undecomposed litter and semi-decomposed one and immersion time obeyed logarithmic regression relationship(R＞0.87), while the water-holding speed rate and immersion time obeyed power function relationship(R＞0.87).

Keywords: typical forest communities; litter; hydrological characteristics; Liaoheyuan Nature Reserve

森林枯落物层是由林分凋落的茎、叶、枝条、芽、鳞片、花、果实、树皮等的残体累积形成的，是森林结构的重要组成部分，作为第二个水文作用层影响着森林生态系统水文过程，是森林涵养水源的主要作用层[1]。除此之外在阻滞地表径流、减少林地蒸发、改善土壤结构和增强土壤抗冲能力等方面均具有重要作用。国内外学者在不同区域、不同森林类型的研究多为对枯落物自身水文特性的研究，对其影响地表径流和侵蚀土壤的机理等方面研究也取得了一定成果[2-3]。Bormann[4]认为森林枯落物层较大的水分劫持能力影响着降雨对林地土壤和植被水分的供应和补充；Lee 等[5]认为枯落物对降雨的截留量取决于其蓄水容量。我国森林枯落物的最大持水率平均为自身干质量的 309.54%，林地枯落物层的最大持水量平均为 4.18 mm[6]。国内学者对云南纳帕海[7-8]、重庆四面山[9]、北京山区[10]、宁夏六盘山[11]、岷江上

收稿日期：2013-07-28　　修回日期：2013-08-03

资助项目：林业公益性行业科研专项“森林生态服务功能分布式定位观测与模型模拟”(201204101)

作者简介：于晓文(1987—)，女(汉族)，山东省威海市人，硕士研究生，主要研究方向为森林生态。E-mail：yuxiaowen1021@163.com。

通信作者：韩海荣(1963—)，男(汉族)，青海省西宁市人，教授，博士生导师，主要从事森林生态学方面的研究工作。E-mail：hanhr@bjfu.edu.cn。

游[12]、广西龙脊梯田[13]、祁连山[14]、辽西海棠山[15]、重庆缙云山[16]等地的典型森林枯落物进行了研究，研究发现枯落物持水的开始阶段速度较快，随后持水速率逐渐减缓，直至达到最大持水量；枯落物分解程度越大，持水能力越强；刘向东等[17]认为油松枯落物截留降雨量与降雨量的关系符合幂函数关系。目前关于油松不同龄组、华北落叶松和杨桦阔叶混交林枯落物的对比研究相对较少，因此本研究通过定量分析辽河源自然保护区大窝铺林场典型森林群落油松林、杨桦混交林、华北落叶松林林下枯落物的储量和持水过程，在揭示其水文特性的基础上，以期为该地区水土保持、水源涵养工作提供理论依据，进一步探索该地区的森林保护模式。

1 研究区概况

研究地点选在河北省平泉县辽河源自然保护区大窝铺林场(118°22′—118°37′E，41°01′—41°21′N)。该地区处于暖温带向寒温带过渡地带，属于半湿润半干旱大陆性季风型山地气候，年均气温7.3 ℃，无霜期110～125 d，全年日照2 000～2 900 h，年平均降雨量540 mm，年平均蒸发量1 800 mm，湿润度为0.4，历年平均晴天日数为170 d左右。土壤主要是棕壤土和褐土，土层深厚。

森林植被主要是乔木油松(*Pinus tabuliformis*)天然林、山杨林(*Populus davidiana*)和白桦林(*Betula platyphylla*)及其混交林、华北落叶松林(*Larix gmelinii*)；灌木层有锦带花(*Weigela florida*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、榛(*Corylus heterophylla*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)等；草本层以细叶薹草(*Carex rigescens*)为主。

2 研究方法

2.1 样地调查

于2012年7—9月对大窝铺林场典型森林群落进行调查，样地面积为20 m×30 m，每种类型重复3次，采用系统样点观测法测定其郁闭度，在标准地沿对角线间隔1 m，判断样点是否为树冠遮盖，统计被遮盖样点数，即可算出郁闭度，即：郁闭度＝被树冠遮盖的样点数/样点总数，对树木进行每木检尺，测量树高、胸径等因子，样地基本情况详见表1。

表1 研究区样地基本情况

编号	森林类型	坡度/(°)	坡向	郁闭度	海拔/m	密度/(株·hm^{-2})	平均树高/m	平均胸径/cm
Ⅰ	40 a油松纯林	27	南	0.62	1 004	1 017	11.33	16.1
Ⅱ	50 a油松纯林	17	南	0.55	998	634	15.60	20.6
Ⅲ	60 a油松纯林	18	北	0.37	990	434	20.68	38.4
Ⅳ	25 a杨桦混交林	19	西	0.65	1 067	917	11.26	16.2
Ⅴ	25 a华北落叶松纯林	18	西	0.65	995	1 500	9.57	11.7

2.2 方法测定

2.2.1 *枯落物储量调查* 在每个样地沿对角线方向设0.5 m×0.5 m的样方3个，按未分解层、半分解层分别取样，未分解层由颜色、形态基本保持刚落地时状态的凋落物组成，外表看不出被分解的迹象，半分解层是凋落物分解一定程度形成的，其叶形不十分完整，叶肉组织变色并开始腐烂，但有可辨认的叶脉相连，颜色多为灰褐至灰黑色，质地柔软，现场记录各层厚度和取样重。取样带回实验室后在95 ℃烘干称重，计算单位面积枯落物储量。

2.2.2 *枯落物持水量和持水过程研究* 采用室内浸泡法测定枯落物持水量和持水过程。将烘干枯落物称重后放入细孔纱布袋内，完全浸没于清水中，分别待浸泡0.5，1，2，4，6，8，10和24 h后，将纱布袋取出并静置5 min后，迅速称量其湿重，每次称量的枯落物湿重与浸水前干重的差值即为浸水时段内的持水量，该值与浸水时间的比值为该时刻的持水速率，表示的是单位时间内枯落物的持水量，枯落物浸水24 h后的持水量为其最大持水量[18]，这时的湿重与干重之比为枯落物最大吸湿比，用来反映枯落物持水力大小。

枯落物通常不会达到其最大持水量，所以采用有效持水量来反映其对降水的实际拦蓄情况，计算公式为[19]：

$$W=(0.85R_m-R_0)\cdot M$$

式中：W——有效拦蓄量(t/hm^2)；R_0——自然含水率(%)；R_m——最大持水率(%)；M——枯落物干重(t/hm^2)。

3 结果与分析

3.1 不同森林类型枯落物储量

林下枯落物的储量和厚度对准确评价森林水文功能具有重要作用。不同森林类型枯落物的厚度和

储量受森林立地状况、林分类型和生长状况的影响,枯落物自身的产生量和分解速度,以及累计年限的不同也会造成枯落物储量的不同[20]。从表 2 可以看出,不同森林类型林下枯落物总储量变化范围为7.92～15.56 t/hm^2,总储量大小排序依次为:60 a 油松纯林(15.56 t/hm^2)＞50 a 油松纯林(12.85 t/hm^2)＞40 a 油松纯林(12.02 t/hm^2)＞杨桦混交林(11.99 t/hm^2)＞华北落叶松纯林(7.92 t/hm^2),造成这一现象的原因与针阔叶树种组成不同有关,而且累积年限对枯落物储量的影响在不同林龄油松林中表现的比较明显。分析不同林分枯落物的未分解层和半分解层发现,尽管不同层次所占比例不同,但由于半分解层是枯落物常年分解累积形成的,所以均表现出半分解层储量大于未分解层的现象,其中杨桦混交林林下枯落物半分解层储量占总储量比例最大,为71.46%,其次为 60 a 油松纯林,为 59.05%,其它林分半分解层储量所占比例相差不大,40 a 油松纯林半分解层储量所占比例最小,为 50.57%;未分解层则是 40 a 油松纯林占比例最大,为 49.43%,其次为 50 a 油松纯林,为 47.41%,杨桦混交林未分解层占比例最小,为 28.54%。这是由于针阔叶树种枯落物分解能力不同所致,阔叶树种枯落物分解能力强,针叶树种枯落物分解能力弱,使得杨桦混交林林下枯落物大部分处于半分解状态。又由于油松针叶含油脂,不易分解,使得华北落叶松林下枯落物半分解层比例略高于油松纯林。

表 2　研究区不同森林类型枯落物厚度和储量

森林类型	枯落物厚度/mm			枯落物总储量/(t·hm^{-2})	未分解层		半分解层	
	未分解层	半分解层	合计		储量/(t·hm^{-2})	比例/%	储量/(t·hm^{-2})	比例/%
Ⅰ	26	13	39	12.02	5.94	49.43	6.08	50.57
Ⅱ	32	21	53	12.85	6.09	47.41	6.76	52.59
Ⅲ	27	24	51	15.56	6.37	40.95	9.19	59.05
Ⅳ	38	19	57	11.99	3.42	28.54	8.57	71.46
Ⅴ	25	12	37	7.92	3.52	44.41	4.40	55.59

注:森林类型编号所代表的具体森林类型详见表 1。下同。

3.2　不同森林类型枯落物的水文效应

3.2.1　*枯落物不同分解层次的最大持水能力*　通常用枯落物最大持水量来表征枯落物实际最大可吸持水分的多少。从表 3 可以看出,浸泡 24 h 以后,不同森林类型以杨桦混交林的最大持水量最大,为 38.13 t/hm^2,其次为 60 a 油松纯林(23.69 t/hm^2),50 a 油松纯林(22.95 t/hm^2)和华北落叶松纯林(22.27 t/hm^2),40 a 油松纯林枯落物最大持水量最小,为 21.31 t/hm^2。由表 3 还可看出,研究区不同森林群落林下枯落物最大持水率变化范围为 164.12%～333.06%,即枯落物最大可以吸持其自身重量 1.6～3.3 倍的水分,其大小排序为:杨桦混交林＞华北落叶松纯林＞50 a 油松纯林＞60 a 油松纯林＞40 a 油松纯林。

比较枯落物不同分解层次可以发现,最大持水率和最大持水量变化趋势不尽相同,如 40 a 油松纯林枯落物未分解层最大持水率为 130.35%,小于华北落叶松林枯落物的未分解层(218.79%),但是其未分解层最大持水量(7.94 t/hm^2)却高于华北落叶松纯林枯落物未分解层最大持水量(7.70 t/hm^2);半分解层枯落物最大持水率最大的是华北落叶松纯林(330.97%),而最大持水量最大的是杨桦混交林的半分解层枯落物(25.53 t/hm^2)。这是因为枯落物最大持水量不仅受枯落物自然状态影响,还与枯落物储量和累积年限等因素有关。

3.2.2　*枯落物不同分解层次的有效拦蓄量*　枯落物最大持水率和最大持水量反映的是枯落物吸持水分能力的大小,却不能准确反映枯落物对次降水的拦蓄能力,而有效拦蓄量是反映枯落物对次降水拦蓄能力的有效指标。从表 3 可以看出,不同森林类型枯落物有效拦蓄量变化范围为 16.99～28.77 t/hm^2,且与最大持水量表现出相同的规律,大小排序为:杨桦混交林＞60 a 油松纯林＞50 a 油松纯林＞40 a 油松纯林＞华北落叶松纯林,而且不同林型枯落物半分解层有效拦蓄量都大于未分解层,说明了半分解层在降雨拦蓄过程中的重要作用。

3.2.3　*枯落物不同分解层的次最大持水力*　枯落物持水力可以真实反映枯落物层吸持水分能力的大小,而通过枯落物最大吸湿比的大小可以衡量枯落物物吸持水分能力的强弱、涵养水源效果的显著与否[21]。从表 3 可以看出,不同森林类型枯落物最大吸湿比排序为:杨桦混交林(4.33)＞华北落叶松纯林(3.75)＞50 a 油松纯林(2.90)＞60 a 油松纯林(2.89)＞40 a 油松纯林(2.64),说明杨桦混交林枯落物可以吸持比

自身更多的水分。就不同林地枯落物未分解层而言，最大吸湿比变化范围为 2.13～4.68，大小排序为：杨桦混交林(4.68)＞华北落叶松纯林(3.19)＞40 a 油松纯林(2.30)＞60 a 油松纯林(2.21)＞50 a 油松纯林(2.13)。在半分解层中，华北落叶松纯林枯落物吸湿比最大，为 4.31，其次为杨桦混交林(3.98)，50 a 油松纯林(3.67)和 60 a 油松纯林(3.58)，40 a 油松纯林枯落物半分解层吸湿比最小，为 2.98。除杨桦混交林枯落物外，其余森林类型均表现为半分解层最大吸湿比要大于未分解层。

表 3 不同森林类型枯落物持水性能

森林类型	最大持水率/%			最大持水量/(t·hm^{-2})			有效拦蓄量/(t·hm^{-2})			最大吸湿比		
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	合计	未分解层	半分解层	合计	未分解层	半分解层	平均
Ⅰ	130.35	197.89	164.12	7.34	13.97	22.31	6.33	10.82	17.15	2.30	2.98	2.64
Ⅱ	113.28	266.93	190.10	6.73	16.22	22.95	5.21	13.17	18.38	2.13	3.67	2.90
Ⅲ	121.29	257.88	189.58	7.73	23.69	31.42	6.13	19.32	25.46	2.21	3.58	2.89
Ⅳ	368.14	297.97	333.06	12.60	25.53	38.13	10.05	18.72	28.77	4.68	3.98	4.33
Ⅴ	218.79	330.97	274.88	7.70	14.57	22.27	5.76	11.23	16.99	3.19	4.31	3.75

采用 SPSS 分析软件对枯落物储量、最大持水量和最大吸湿比进行 Pearson 相关分析，结果详见表 4。由表 4 可知，枯落物储量与最大持水量呈显著正相关关系，与其最大吸湿比呈不显著负相关关系，最大吸湿比与最大持水量呈不显著正相关关系，说明枯落物最大持水量直接受其储量的影响。

表 4 不同森林类型枯落物储量、最大持水量和最大吸湿比的相关性分析

项 目	储量	最大持水量	最大吸湿比
储 量	—	0.664*	−0.188
最大持水量		—	0.598
最大吸湿比			—

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关。

3.3 不同森林类型枯落物持水过程分析

3.3.1 *枯落物层持水量与浸泡时间的关系* 枯落物层持水量与浸泡时间和原始干燥度有关，对不同森林类型枯落物不同分解层次持水过程进行绘图分析如图 1—2。从图 1—2 可以看出，不同森林类型枯落物未分解层、半分解层均表现出相同的规律，即在浸水开始的前 0.5 h 内，持水量迅速增加，枯落物在这个阶段对短历时强降雨的滞后径流效果显著，这也是枯落物调节水文、保持水土作用的功能所在[22]。之后随着浸水时间的延长，持水量持续增加，但是增长速度逐渐放缓，未分解层浸水 6～8 h 后持水量随时间的变化很小，半分解层浸水 10 h 后持水量增加趋于平缓，说明半分解层持水能力要高于未分解层，浸水 24 h 后各层持水量可视为达到饱和。未分解层各时段持水量大小顺序为：杨桦混交林＞60 a 油松纯林＞50 a 油松纯林＞华北落叶松纯林＞40 a 油松纯林，半分解层各时段持水量大小顺序为：华北落叶松纯林＞杨桦混交林＞50 a 油松纯林＞60 a 油松纯林＞40 a 油松纯林。不同森林类型枯落物未分解层和半分解层浸水 24 h 持水量与浸水时间的关系可用对数函数进行拟合(R^2＞0.76)。

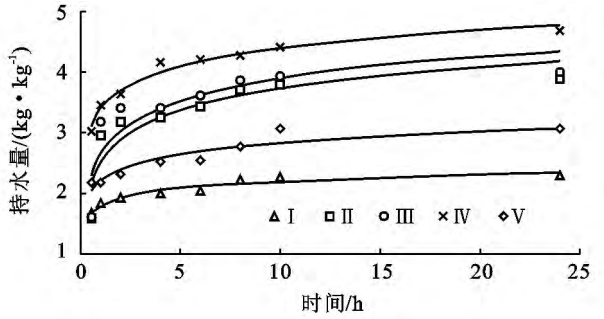


图 1 不同森林类型枯落物未分解层持水量与时间的关系

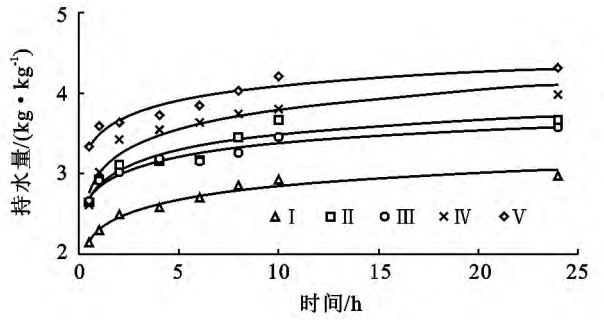


图 2 不同森林类型枯落物半分解层持水量与时间的关系

3.3.2 *枯落物层持水速率与浸泡时间的关系* 在浸水过程中，不同森林类型枯落物持水速率与浸水时间表现出一定的规律性。从图 3—4 可看出，同持水量随浸水时间的变化趋势一致，在浸水的前 0.5 h 内，未分解层、半分解层持水速率增长迅速，此后持水速率逐渐减小，浸水 2 h 后，急剧下降，6～8 h 后下降速度逐渐变缓，至 24 h 持水达到饱和。这是因为刚浸

水时,风干状态的枯落物中的枝叶表面和死细胞水势差较大,使得持水速率较高,随着枯落物接近其最大持水量,持水速率随之减缓。从图 3—4 中还可以看出,不同森林类型枯落物半分解层持水速率要高于未分解层,这是由于枯落物经分解后其内部结构组成发生变化,导致持水能力变强。不同森林类型枯落物未分解层和半分解层浸水 24 h 持水速率与浸水时间的关系可用幂函数进行拟合($R^2>0.76$)。

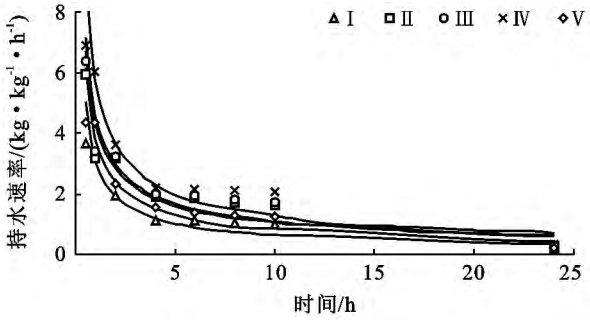


图 3　不同森林类型枯落物未分解层持水速率与时间的关系

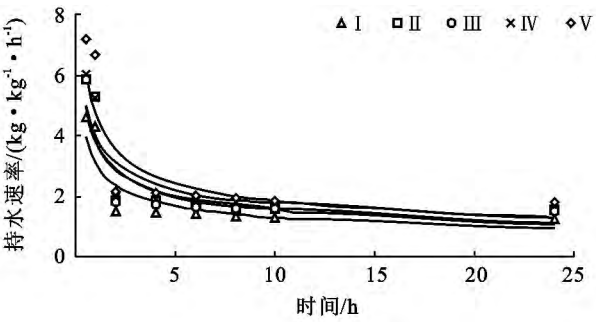


图 4　不同森林类型枯落物半分解层持水速率与时间的关系

4　结 论

(1) 辽河源自然保护区典型森林群落林下枯落物总储量变化范围为 7.92～15.56 t/hm^2,大小排序依次为:60 a 油松纯林>50 a 油松纯林>40 a 油松纯林>杨桦混交林>华北落叶松纯林,不同森林类型均表现为半分解层储量大于未分解层储量。

(2) 不同森林类型林下枯落物最大持水率变化范围为 164.12%～333.06%,大小排序为:杨桦混交林>华北落叶松纯林>50 a 油松纯林>60 a 油松纯林>40 a 油松纯林。最大持水量变化范围为 21.31～38.13 t/hm^2,由大到小依次为:杨桦混交林>60 a 油松纯林>50 a 油松纯林>华北落叶松纯林>40 a 油松纯林,由于储量不同的原因,各枯落物层最大持水量与枯落物最大持水率排序不完全相同。

(3) 各枯落物层有效拦蓄量变化范围为 16.99～28.77 t/hm^2,大小排序为:杨桦混交林>60 a 油松纯林>50 a 油松纯林>40 a 油松纯林>华北落叶松纯林,与最大持水量的变化规律相同,在各林分中枯落物半分解层有效拦蓄量都大于未分解层。

(4) 枯落物浸水过程中,前 0.5 h 内枯落物持水速率最高,持水量增加迅速,随后持水速率逐渐减小,持水量缓慢增加直至达到饱和。对枯落物持水过程进行回归分析,枯落物未分级层和半分解层持水量与浸水时间均符合对数函数关系($R>0.87$),持水速率与浸泡时间符合幂函数关系($R>0.87$)。

[参 考 文 献]

[1] 王波,张洪江,徐丽君,等.四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究[J].水土保持学报,2008,22(4):90-94.

[2] 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.

[3] 樊登星,余新晓,岳永杰,等.北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J].北京林业大学学报,2008,30(11):177-181.

[4] Bormann F H, Likens G E. Pattern and Processes in a Forested Ecosystem[M]. New York: Springer Verlag, 1979:11-20.

[5] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山主要森林类型枯落物的水文功能[J].北京林业大学学报,2009,31(1):91-99.

[6] 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.

[7] 陆梅,田昆,赖建东,等.高原湿地纳帕海周边山地不同植被类型枯落物持水特性[J].水土保持通报,2011,31(1):28-34.

[8] 周祥,赵一鹤,张洪江,等.云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J].生态环境学报,2011,20(2):248-252.

[9] 王波,张洪江,徐丽君,等.四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究[J].水土保持学报,2008,22(4):90-94.

[10] 王士永,余新晓,贾国栋,等.北京山区主要人工林枯落物水文效应[J].中国水土保持科学,2011,9(5):42-47.

[11] 莫菲,于澎涛,王彦辉,等.六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程[J].生态学报,2009,29(6):2869-2875.

[12] 庞学勇,包维楷,张咏梅.岷江上游中山区低效林改造对枯落物水文作用的影响[J].水土保持学报,2005,19(4):120-122.

[13] 王龙,宋维峰,杨寿荣,等.广西龙脊梯田区森林枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(6):84-88.

[14] 闫文德,张学龙,王金叶,等.祁连山森林枯落物水文作用的研究[J].西北林学院学报,1997,12(2):7-14.

(下转第 75 页)

[参 考 文 献]

[1] 王伯荪.植物种群学[M].广东 广州:中山大学出版社,1989.

[2] Greig S P. Quantitative Plant Ecology [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1983.

[3] 高永恒,曾晓阳,周国英,等.长江源区高寒湿地植物群落主要种群种间关系分析[J].湿地科学,2011,9(1):1-7.

[4] Moore P D, Chapman S B. Methods in plant ecology [M]. 2nd. London: Blackwell Scientific Publications, 1986.

[5] Dice L R. Measure of the amount of ecological association between species[J]. Ecology, 1945, 26(3): 297-302.

[6] Schluter D. A variance test for detecting species association with some example applications [J]. Ecology, 1984,65(3):998-1005.

[7] Mourad M M, Sharawy S W. The interspecific relationships of Astragalus species in Egypt assessed by the morphoanatomical characters of the pod [J]. Feddes Repertorium, 2010,121(1/2):38-58.

[8] Myster R W, Pickett S T A. Dynamics of associations between plants in ten old fields during 31 years of succession[J]. Journal of Ecology, 1992,80(2):291-302.

[9] 郭志华,卓正大,陈洁,等.庐山常绿阔叶、落叶阔叶混交林乔木种群种间联结性研究[J].植物生态学报,1997,21(5):424-432.

[10] 邓贤兰,刘玉成,吴杨.井冈山自然保护区栲属群落优势种群的种间联结关系研究[J].植物生态学报,2003,27(4):531-536.

[11] 王文进,张明,刘福德,等.海南岛吊罗山热带山地雨林两个演替阶段的种间联结性[J]. 生物多样性,2007,15(3):257-263.

[12] 孙中伟,赵士洞.长白山北坡锻树阔叶红松林群落木本植物种间联结性与相关性研究[J].应用生态学报,1996,7(1):1-5.

[13] 牛莉芹,上官铁梁,程占红.中条山中段植物群落优势种群的种间关系研究[J].西北植物学报,2005,25(12):2465-2471.

[14] 房飞,胡玉昆,张伟,等.高寒草原植物群落种间关系的数量分析[J].生态学报,2012,32(6):1898-1907.

[15] 李秋玲,范庆安,马晓勇,等.山西黄河湿地植被优势种群种间关系[J].生态学杂志,2007,26(10):1516-1520.

[16] 秦磊.天津七里海古泻湖湿地环境演变研究[J].湿地科学,2012,10(2):181-187.

[17] 王祖伟,刘明舵,李兆江,等.七里海湿地环境生态系统退化与修复[J].水土保持研究,2005,12(5):244-247.

[18] 胡蓓蓓,徐利淼,李兆江,等.天津市七里海湿地价值评估[J].安徽农业科学,2012,40(21):11001-11004.

[19] 王凤琴,苏海潮,刘利华,等.天津七里海湿地鸟类区系及类群多样性研究[J].天津农学院学报,2003,10(3):16-22.

[20] 冀潇檬,曾昭春,郭冉,等.七里海浮游生物及底栖动物的初步调查研究[J].河北渔业,2012(6):33-36.

[21] 杜宁,郭卫华,吴大千,等.昆嵛山典型林下灌草层植物种间关系研究[J].山东大学学报,2007, 42(3):71-77.

[22] 娄彦景,赵魁义.三江平原毛苔草群落近 30 年演替过程中的种间联结性分析[J].生态学杂志,2008,27(4):509-513.

[23] 林勇明,吴承祯,洪伟,等.长苞铁杉林乔木层优势种群种间关联及尺度效应研究[J]. 广西植物,2005,25(6):526-532.

(上接第 69 页)

[15] 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.

[16] 孙艳红,张洪江,程金花,等.重庆缙云山林地枯落物及土壤水文效应研究[J].中国水土保持科学,2006,4(3):31-35.

[17] 刘向东,吴钦孝.黄土高原油松人工林枯枝落叶层水文生态功能研究[J].水土保持学报,1991,5(4):87-91.

[18] 方海东,纪中华,杨艳鲜,等.金沙江干热河谷新银合欢人工林枯落物层持水特性研究[J].水土保持学报,2005,19(5):52-55.

[19] 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):39-143.

[20] 王佑民,国林地枯落物持水保土作用研究概况[J].水土保持学报,2000,14(4):108-113.

[21] 张君玉,程金花,张洪江,等.晋西黄土丘陵区 3 个树种人工林枯落物的持水特性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(10):69-74.

[22] 宋庆丰,杨新兵,张金柱,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].生态环境学报,2009,18(6):2316-2320.