

间伐抚育对小五台山华北落叶松林下 枯落物持水特性的影响

尤海舟^{1,2}, 毕君^{1,2}, 宋熙龙³, 王超^{1,2}

(1. 河北省林业科学研究院, 河北 石家庄 050061; 2. 河北省林木良种工程技术研究中心,
河北 石家庄 050061; 3. 河北省林业局外资项目管理中心, 河北 石家庄 050081)

摘要: 从涵养水源角度出发, 通过野外调查与浸水实验, 对河北省小五台山华北落叶松林下枯落物不同间伐强度下枯落物储量及持水特性进行了研究。结果表明, 未分解层和半分解层所占总储量比例在间伐前后存在明显差异。间伐抚育前, 未分解层所占总储量比例小于半分解层, 间伐后则相反。枯落物储量和最大持水量在不同间伐强度间变化顺序相同, 均为: 弱度间伐 > 对照 > 中度间伐 > 强度间伐 > 超强度间伐。枯落物储量和最大持水量在不同间伐强度间存在显著差异 ($p < 0.01$), 最大持水率在不同间伐强度间差异不显著 ($p > 0.05$); 在以保留木数量为 600 株/hm² 的强度间伐时, 有效拦蓄量最大为 162.41 t/hm², 相当于 16.241 mm 降水。

关键词: 河北省小五台山; 华北落叶松; 枯落物; 间伐抚育; 持水特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0063-05

中图分类号: S715.3

Influences of Thinning on Water-holding Characteristics of Litters for *Larix Principis-Rupprechtii* Forest in Xiaowutai Mountains

YOU Hai-zhou^{1,2}, BI Jun^{1,2}, SONG Xi-long³, WANG Chao^{1,2}

(1. Forestry Science Institute of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

2. Hebei Research Center for Trees Thoroughbred Engineering Technology, Shijiazhuang, Hebei 050061,

China; 3. Foreign Capital Project Management Center of Hebei Forestry Bureau, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: From a water conservation perspective, the cumulated mass (CM) and water-holding characteristics of litter were studied at different thinning intensities of *Larix principis-rupprechtii* forest in Xiaowutai Mountains based on field investigation and indoor experiment. Results showed that there were significant differences in the CM of different layers (un-decomposed and half-decomposed) before and after thinning. The ratio of the un-decomposed layer to the CM was smaller than the half-decomposed before thinning, but contrary after thinning. In all the sample plots, the CM and the maximal water holding capacity (MWHC) varied in the same order of light thinning > control > medium thinning > heavy thinning > super-strong thinning. There were significant differences in the CM and MWHC at different thinning intensities ($p < 0.01$), but insignificant differences in the maximal water holding rate ($p > 0.05$). The modified interception rate showed the maximum of 162.41 t/hm² at the thinning intensity of 600 plants/hm² (reserved trees), which was equivalent to 16.241 mm precipitation.

Keywords: Xiaowutai Mountains of Hebei Province; *Larix principis-rupprechtii* forest; litter; thinning; water-holding characteristic

林下枯落物是指覆盖在林地土壤表面的未分解、半分解植物凋落物, 它是森林植物地上部分各器官的枯死、脱落物总称^[1]。枯落物层是森林结构重要的组成部分, 是森林水文效应的第二活动层^[2-3]。对于森

林水文学的研究, 枯落物持水特性一直是重点, 国内外学者在不同区域对许多森林类型下的枯落物水文学特性作了研究, 内容涉及枯落物凋零、分解速度、截持降水、抑制土壤水分蒸发、增强土壤入渗、影响地表

收稿日期: 2012-07-03

修回日期: 2012-07-25

资助项目: 林业公益性行业科研专项子课题“华北地区 5 个优势树种分林龄和起源的生态服务功能分布式观测研究”(201204101-8); 河北省科技支撑计划“小五台山森林群落特征、功能及调控技术研究”(11240615D)

作者简介: 尤海舟(1983—), 女(汉族), 河北省保定市人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事森林生态、森林水文等方面的研究。E-mail: you-haizhou1204@163.com。

径流等方面^[4-17]。以前的研究多集中在对不同森林类型枯落物层水源涵养能力的比较,将间伐抚育同枯落物水文特性联系起来研究的报道较少。本文结合当地林业生产,初步分析了不同间伐强度对华北落叶松林下枯落物水文特性的影响,这对深入认识间伐抚育对森林水文效应的影响、认识森林与水的关系、确定最佳间伐抚育模式具有重要意义。

1 研究区概况

研究区位于河北省小五台山自然保护区,地理坐标为 114°47′—115°30′E,39°50′—40°7′N。河北小五台山毗邻首都北京,地处太行山、燕山和恒山交汇地带,生态区位十分重要。该区气候为东亚大陆性季风气候,年均温 6.4℃,年均降水量 700 mm,日照时数为 2 600 h 以上,年辐射量在 543.92 J/cm² 以上,无霜期 80~140 d。土壤类型为褐土、山地棕壤、亚高山

草甸土。森林植被以人工针叶林和天然次生阔叶林为主,针叶林带位于阴坡 2 000~2 400 m,主要林型有华北落叶松林、云杉林、落叶松云杉林、云杉臭冷杉落叶松林等。

2 研究方法

2.1 样地设置

选择小五台山王喜洞林区华北落叶松人工林为试验林地。2009 年将中龄级的华北落叶松人工林进行了弱度(33%)、中度(50%)、强度(67%)和超强度(83%)间伐,每种间伐强度试验林地为 0.67 hm²。没有经过间伐抚育的落叶松人工林密度为 900 株/hm²,作为试验对照。根据立地条件的不同,针对不同间伐强度,在各试验林地内,设置不小于 30 m×30 m 的固定样地,进行基本样地调查。不同间伐强度华北落叶松林固定样地基本情况如表 1 所示。

表 1 不同间伐强度固定样地基本情况

间伐强度	保留木密度/ (株·hm ⁻²)	林龄/ a	样地大小/ m ²	郁闭度	坡向	坡位	海拔/ m	平均胸径/ cm	草本盖 度/%
C	900	30	900	0.90	N	上	2 048	17.5	45
L	600	30	900	0.80	N	中	2 027	18.7	55
M	450	30	900	0.60	N	中上	2 041	19.1	70
H	300	30	1 140	0.40	N	中下	1 998	20.2	78
S	150	30	2 298	0.35	N	中下	1 998	20.3	80

注:C为对照;L为弱度间伐;M为中度间伐;H为强度间伐;S为超强度间伐。

2.2 林下枯落物采集

在不同间伐强度固定样地内,沿对角线上、中、下布设 1 m×1 m 枯落物样方 3~5 个,分别测定未分解层、半分解层厚度和质量,并分层取样,用于测定枯落物储量及其持水量、持水率及其持水过程。

2.3 枯落物持水量、持水率测定

把自然风干的枯落物用烘箱烘干(80℃烘 8 h),分别称其干重。将烘干称重后的枯落物选取 50~100 g 样品,在清水中浸泡 24 h 后称重,计算其最大持水率和有效拦蓄率。在此基础上,根据枯落物储量,计算最大持水量和有效拦蓄量,计算公式为:

$$R_{h\max} = (G_{24} - G_d) / G_d \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{sv} = 0.85R_{h\max} - R_0 \quad (2)$$

$$M_{h\max} = R_{h\max} \times M \quad (3)$$

$$M_{sv} = R_{sv} \times M \quad (4)$$

式中: G_d, G_{24} ——枯落物样品风干状态重和浸水 24 h 后重(g); R_0 ——枯落物自然持水率(%); $R_{h\max}$ ——最大持水率(%); R_{sv} ——有效拦蓄率(%); M ——枯落物储量(t/hm²); $M_{h\max}$ ——最大持水量(t/hm²);

M_{sv} ——有效拦蓄水量(t/hm²)。

2.4 枯落物持水过程分析

将所采集的枯落物烘干后放入布袋称重 W_{ij} (g),然后将布袋置入盛有清水的容器中。测定时段为 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 6, 8, 10 和 20 h。枯落物吸水量和吸水速率计算公式如下:

$$\Delta W_{ij} = W_{i(j+1)} - W_{ij} \quad (5)$$

$$\Delta S_{ij} = \Delta W_{ij} / \Delta t_{ij} \quad (6)$$

式中: ΔW_{ij} ——第 j 种枯落物在 $(j+1)-j$ 浸泡时间段内的吸水量[g/(kg·h)]; $W_{i(j+1)}$ ——第 i 种枯落物 $j+1$ 时段的湿重(g); W_{ij} ——第 i 种枯落物 j 时段的湿重(g); ΔS_{ij} ——第 i 种枯落物在 $(j+1)-j$ 浸泡时间段内的吸水速率[g/(kg·h)]; Δt_{ij} ——第 i 种枯落物 $(j+1)$ 时段与 j 时段的时间差(h)。

2.5 数据统计分析

用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,检验枯落物储量、最大持水率、最大持水量在不同间伐强度之间的差异性。回归检验枯落物吸水量和吸水速率与浸泡时间的相关性。用 Excel 2003 软件制图。

3 结果与分析

3.1 枯落物储量

5 种间伐强度下枯落物储量变动范围为 35.77~68.41 t/hm²(表 2),枯落物储量大小依次是弱度间伐>对照>中度间伐>强度间伐>超强度间伐。随着

间伐强度的增大,未分解层所占总储量的比例逐渐增大,半分解层所占比例逐渐减少。对照样地(900 株/hm²)中未分解层占总储量比例小于半分解层;间伐后样地均为未分解层占总储量比例大于半分解层。由表 3 可知,枯落物储量在不同间伐强度间其存在极显著差异($F=9.821$)。

表 2 不同间伐强度下华北落叶松林下枯落物储量

间伐强度	密度/ (株·hm ⁻²)	总储量/ (t·hm ⁻²)	未分解层		半分解层	
			储量/(t·hm ⁻²)	占总储量比/%	储量/(t·hm ⁻²)	占总储量比/%
C	900	62.99	26.38	41.87	36.61	58.13
L	600	68.41	36.81	53.81	31.59	46.18
M	450	54.51	29.95	54.95	24.56	45.05
H	300	41.29	24.28	58.80	17.02	41.20
S	150	35.77	21.52	60.20	14.24	39.80

3.2 枯落物最大持水量及最大持水率

由图 1 可知,不同间伐强度下枯落物最大持水率的变化范围为 292.21%~352.62%,其中对照样地最大,随着间伐强度的增大呈现逐渐减小的趋势,枯落物不同层次之间半分解层持水率均大于未分解层。最大持水量的变化范围为 103.34~235.73 t/hm²,由多到少依次为弱度间伐>对照>中度间伐>强度间伐>超强度间伐。最大持水量与枯落物储量大小顺序一致,与最大持水率大小顺序略有差异,这主要是因为最大持水量的大小不仅与枯落物本身的性质和结构有关,还与枯落物的储量有关,枯落物储量越大,其持水潜力越大。

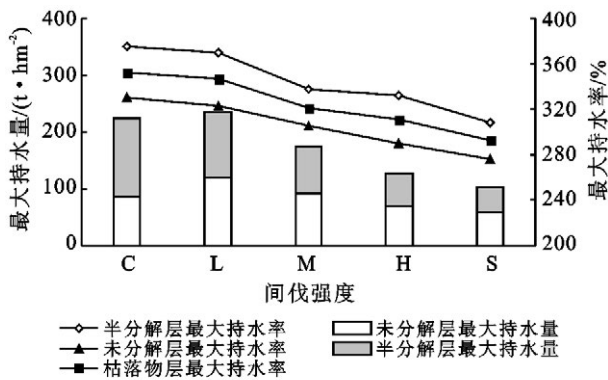


图 1 不同间伐强度下枯落物最大持水量及最大持水率

对最大持水量以及最大持水率在不同间伐强度间进行差异显著性检验(表 3),结果表明,最大持水量在不同间伐强度间存在极显著差异($F=84.951$),而最大持水率在不同间伐强度间差异不显著($F=3.675$).说明间伐强度的不同对持水率的影响较小,而对持水量的影响主要是因为储量的差异。

表 3 枯落物储量、最大持水量、最大持水率在不同间伐强度间差异显著性检验(F 值)

分解层	储量	最大持水量	最大持水率
未分解层	4.539*	9.789**	2.046
半分解层	9.942**	48.474**	3.443
枯落物层	9.821**	84.951**	3.675

注: * $p<0.05$, 差异显著; ** $p<0.01$, 差异极显著。

3.3 枯落物对降水的有效拦蓄

考虑到枯落物的现存量和实际存在状况,有效拦蓄量最能反映不同间伐强度下枯落物实际持水能力的大小。不同间伐强度枯落物的有效拦蓄量及有效拦蓄率见图 2。

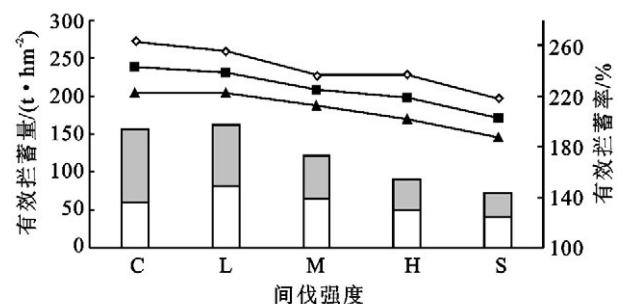


图 2 不同间伐强度下枯落物有效拦蓄量及有效拦蓄率

不同间伐强度下华北落叶松林下枯落物有效拦蓄量变化范围为 71.41~162.41 t/hm²,有效拦蓄量大小依次为:弱度间伐>对照>中度间伐>强度间伐>超强度间伐。有效拦蓄量大小趋势与枯落物储量和最大持水量一致,可见有效拦蓄量受枯落物储量影响较大。

3.4 枯落物持水过程

将 5 种间伐强度下风干后枯落物样品浸泡在清水中,分时段称其重量,计算得到 5 种间伐强度下枯落物持水量及其吸水速率。

3.4.1 枯落物持水量与浸泡时间的关系 由图 3 看出,0~2 h 内持水量增加最快,2~4 h 内持水量增加较快,当枯落物在水中浸泡 6~8 h 时,其持水量变化趋于平缓,即 8 h 之后,其持水量基本不再发生显著变化。

持水量与浸泡时间之间表现出较好的相关性。枯落物持水量与浸水时间的回归分析表明,两者之间存在如下关系:

$$w = a + k \ln t \tag{7}$$

式中: w ——枯落物持水量(g/kg); t ——浸泡时间(h); k ——方程系数; a ——常数。

由分析拟合得到枯落物持水量与浸泡时间的对数方程式如表 4 所示,说明式(7)对未分解层和半分解层枯落物持水量的模拟精度较高($R^2 > 0.85$)。

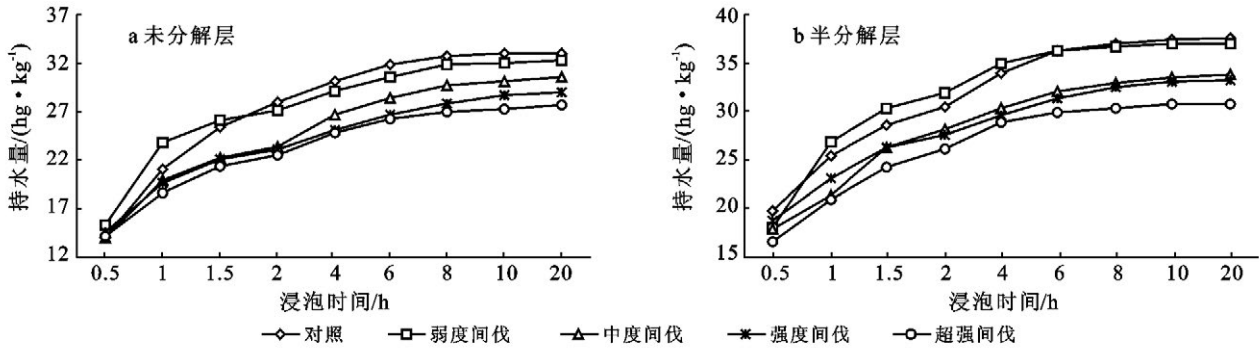


图 3 未分解层和半分解层枯落物持水量与其浸泡时间的关系

表 4 不同间伐强度下枯落物持水量(W)与浸泡时间(t)关系式

间伐强度	密度/ (株·hm ⁻²)	未分解层		半分解层	
		关系式	R ²	关系式	R ²
C	900	$W = 502.78 \ln t + 2\ 149.8$	0.865 5	$W = 499.31 \ln t + 2\ 563.8$	0.928 7
L	600	$W = 376.39 \ln t + 2\ 357.9$	0.894 6	$W = 483.00 \ln t + 2\ 612.7$	0.841 9
M	450	$W = 452.87 \ln t + 1\ 945.9$	0.938 1	$W = 450.88 \ln t + 2\ 301.0$	0.910 5
H	300	$W = 386.12 \ln t + 1\ 933.8$	0.937 9	$W = 400.89 \ln t + 2\ 352.3$	0.930 9
S	150	$W = 374.6 \ln t + 1\ 883.4$	0.917 5	$W = 392.59 \ln t + 2\ 145.9$	0.911 0

3.4.2 枯落物持水速率与浸泡时间的关系 不同间伐强度枯落物吸水速率表明(图 4),枯落物吸水速率均在 0.5 h 内达到最大值,1 h 内吸水速率较快,随时间延长,枯落物吸水速率减慢,到 6~8 h 基本饱和。

刚开始时其吸水速率相差较大,但随浸泡时间延长,5 种间伐强度下枯落物吸水速率趋向一致。这主要是因为随着浸水时间增加,枯落物接近其最大持水量,其持水量增长速率随之减缓所致。

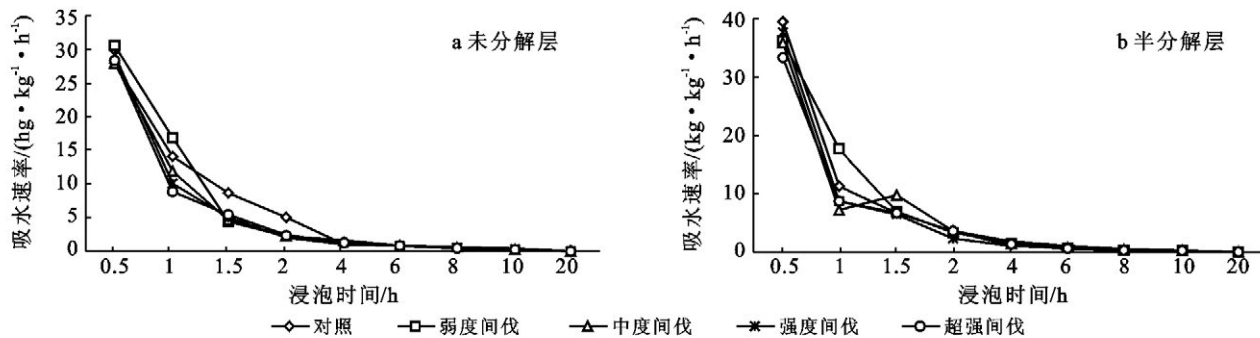


图 4 未分解层和半分解层枯落物吸水速率与其浸泡时间的关系

对所研究的 5 种间伐强度下枯落物吸水速率与浸泡时间之间关系数据进行分析拟合,存在如下

关系:

$$s = kt^n \tag{8}$$

式中: s ——枯落物吸水速率 $(g/(kg \cdot h))$; t ——浸泡时间 (h) ; k ——方程系数; n ——指数。由分析拟合

得到林下枯落物吸水速率与浸泡时间之间的关系式详见表 5。

表 5 不同间伐强度下枯落物持水速率(S)与浸泡时间(t)关系式

间伐强度	密度/ (株·hm ⁻²)	未分解层		半分解层	
		关系式	R ²	关系式	R ²
C	900	$S = 1\ 719.3t^{-2.266\ 5}$	0.866 8	$S = 1\ 577.0t^{-2.036\ 5}$	0.894 1
L	600	$S = 1\ 138.7t^{-1.809\ 5}$	0.954 6	$S = 1\ 603.5t^{-2.205\ 3}$	0.944 3
M	450	$S = 1\ 050.4t^{-1.619\ 5}$	0.960 4	$S = 1\ 287.1t^{-1.825\ 5}$	0.937 5
H	300	$S = 993.12t^{-1.622\ 7}$	0.941 9	$S = 1\ 220.2t^{-1.851\ 5}$	0.917 5
S	150	$S = 989.72t^{-1.732\ 5}$	0.979 4	$S = 1\ 220.2t^{-1.851\ 5}$	0.917 5

4 结论

未分解层和半分解层所占总储量的比例在间伐前后存在明显差异,间伐抚育前,未分解层所占比例小于半分解层,间伐后相反,可能是因为间伐抚育改变了林地的光照、湿度和温度条件,从而改变了枯落物的分解速度。间伐抚育后对林地光照、温度等环境条件的改变程度如何,不同改变程度下的枯落物响应,还有待于进一步研究^[15]。

大量研究表明,枯落物吸持水量可达自身干重的 2~4 倍,各种森林的枯落物层的最大持水率平均为 309.54%;小五台山华北落叶松林下枯落物最大持水率变化范围为 292.21%~352.62%,略大于全国平均水平。周晓峰等^[18]在对蒙古栎林采伐后枯落物量和持水力的变化进行研究时指出蒙古栎林疏伐郁闭度从 0.95 降低到 0.6 时,枯落物储量和最大持水量分别降低了 14.3%和 13.6%;小五台山华北落叶松保留木密度从 900 株/hm² 降低到 450 株/hm²,郁闭度从 0.95 降低到 0.6 时,枯落物储量和最大持水量分别降低了 13.4%和 22.3%。枯落物储量下降幅度与周晓峰等^[18]的研究一致,最大持水量下降幅度大于周晓峰等^[18]的研究,可能是枯落物本身的性质和结构的差异所致。

5 种间伐强度下,华北落叶松林下枯落物储量及最大持水量大小顺序相同,均为弱度间伐>对照>中度间伐>强度间伐>超强度间伐,与最大持水率大小顺序不同。这主要是因为持水量大小不仅与枯落物本身性质和结构有关,还与枯落物的储量有关。经差异显著性检验,枯落物储量及最大持水量在不同间伐强度间存在显著性差异,最大持水率在不同间伐强度间差异不显著。说明间伐强度的差异主要引起枯落物储量的变化,而对枯落物本身的性质和结构影响较小;最大持水量的变化主要因为储量的变化,其水分物理性质并没有显著变化。

不同间伐强度下,枯落物的有效拦蓄量在以保留木数量为 600 株/hm² 的强度间伐时,枯落物的有效拦蓄量最大,相当于 16.241 mm 降水。相比其他学者对于针叶林林下枯落物有效拦蓄量的研究结果,小五台山华北落叶松林下枯落物有效拦蓄量较大,主要是小五台山自然保护区建成后,严格实行封山育林,人为扰动较少,林下枯落物储量较大的结果。

枯落物持水量在 0~2 h 内持水量增加较快,吸水速率在 0~1 h 快速减少,之后均呈趋缓态势,表明小五台山华北落叶松林下枯落物持水量随时间变化过程与间伐强度无关。经分析拟合,得到不同间伐强度下枯落物吸水速率与浸泡时间之间关系式和持水量与浸泡时间的关系式,并对其进行回归分析,均达到显著相关水平,这与许多学者的研究结果一致^[19-21]。

研究表明,不同间伐强度下,保留木数量为 600 株/hm² 的间伐抚育强度下其林下枯落物具有较强水源涵养能力,因此在营造水源涵养林时,应采用合理的间伐抚育强度,增加森林的涵养水源能力。研究得出了华北落叶松林下枯落物水源涵养能力,对该地区水资源的科学管理和利用提供了参考,但由于小区选择的代表性,建议今后的研究中增加观测点,使研究结果能完全代表该地区的实际情况。

[参 考 文 献]

- [1] 张卫强,李召青,周平,等.东江中上游主要森林类型枯落物的持水特性[J].水土保持学报,2010,24(5):130-134.
- [2] 莫菲,王彦辉,熊伟,等.六盘山华北落叶松人工纯林枯落物储量的空间变异分析[J].林业科学,2009,45(9):1-5.
- [3] 王志明,王礼先.水源涵养林效益研究[M].北京:中国林业出版社,1991:32-37.
- [4] 马雪华,杨茂瑞,胡星粥.亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J].林业科学,1999,29(3):199-206.

(下转第 225 页)

时制宜的开发利用,以达到社会效益和生态效益的共同提高。

[参 考 文 献]

- [1] Diego V, Peter H V, Arnold K B, et al. A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 128(10):27-36.
- [2] 蒙吉军,吴秀芹,李正国.黑河流域1988—2000年土地利用/覆被变化研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2004, 40(6):922-929.
- [3] 吴秀芹,蔡运龙.土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(6):576-584.
- [4] 万利.城乡交错带土地利用变化的生态环境影响研究[D].北京:中国农业科学院研究生院,2009.
- [5] Turner B L, Skole D L, Sanderson S. Land use and land cover change: science/research plan[R]. IGBP Report, No. 35 and HDP Report No. 7, Stockholm and Geneva, 1995.
- [6] 陈龙华,胡邵永.基于多波段影像特征的土地利用分类[J]. *科技创新导报*, 2010, (34):86.
- [7] 龚建周,夏北成.广州市1990—2005年植被覆盖度的时空变化特征[J]. *生态环境*, 2006, 15(6):1289-1294.
- [8] 杨朝现,陈荣蓉,刘秀华.重庆市北碚区土地利用变化及驱动力分析[J]. *西南农业大学学报:社会科学版*, 2003, 1(2):26-29.
- [9] 朱会义,李秀彬,何书金,等.环渤海地区土地利用的时空变化分析[J]. *地理学报*, 2001, 56(3):253-260.
- [10] 赵健,魏成阶,黄丽芳.土地利用动态变化的研究方法及其在海南岛的应用[J]. *地理研究*, 2001, 20(6):723-730.
- [11] 朱邦耀,卞维珍,李秀霞.基于GIS的经济欠发达地区土地利用动态变化分析及预测[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3):273-276.
- [12] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1):81-87.
- [13] 马礼,苏海霞.河北涪源县土地利用动态变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(1):131-136.
- [14] 张新长,梁金成.城市土地利用动态变化及预测模型研究[J]. *中山大学学报*, 2004, 43(2):121-125.
- [15] 刘纪远.西藏地区土地利用[M].北京:科学出版社, 1992.
- [16] 刘纪远.国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. *遥感学报*, 1997, 1(3):225-230.
- [17] 攀玉山,刘纪远.西藏自治区土地利用[M].北京:科学出版社, 1994.
- [18] 闫淑君,洪伟.闽江口琅岐岛土地利用的时空动态[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5):11-16.
- [19] 叶亚平,李婷.吴江市土地利用变化及其生态效应[J]. *城市环境与城市生态*, 2010, 23(5):1-5.
- (上接第67页)
- [5] 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.
- [6] 吴钦孝,刘向东,赵鸿雁.陕北黄土丘陵区油松林枯枝落叶层蓄积量及其动态变化[J]. *林业科学*, 1993, 29(1):63-66.
- [7] 高甲荣,尹婧,牛健植,等.长江上游亚高山暗针叶林林地水文作用初探[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(4):74-79.
- [8] 刘世荣,孙鹏森,王金锡,等.长江上游森林植被水文功能研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5):451-456.
- [9] 张远东,刘世荣,马蒋明,等.川西亚高山桦木林的林地水文效应[J]. *生态学报*, 2005, 25(11):2939-2946.
- [10] 张洪江,程金华,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*, 2009, 17(3):55-58.
- [11] Calder R. A stochastic model of rainfall interception[J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 89(1/2):65-71.
- [12] Richard L, Granillo A B. Soil protection by natural vegetation on clearcut forest land in Arkansas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1985, 40(4):379-382.
- [13] Kavvadias V A, Alifragis D, Tsiontis A, et al. Litter fall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in Northern Greece[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 144(1/3):113-127.
- [14] Słodciak M, Novak J, Skovsgaard J P. Wood production, litter fall and humus accumulation in a Czech thinning experiment in Norway spruce[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 209(1/2):157-166.
- [15] 杨新兵,张伟,张建华,等.生态抚育对华北落叶松幼龄林枯落物和土壤水文效应的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1):119-122.
- [16] 程云.缙云山森林涵养水源机制及其生态功能价值评价研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [17] 罗菊春.抚育改造是森林生态系统经营的关键性措施[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1):121-124.
- [18] 周晓峰,李庆夏.帽儿山、凉水森林水分循环的研究[C]//林业部科技司.中国森林生态系统定位研究.哈尔滨:东北林业大学出版社,1994:213-221.
- [19] 韩友志,邢兆凯,顾宇书,等.浑河上游白桦冷杉等4种林分枯落物储量及持水特性[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(11):15-18.
- [20] 周择福,林富荣,宋吉红,等.不同经营模式的水源涵养林生态防护功能研究[J]. *林业科学研究*, 2003, 16(2):189-195.
- [21] 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]. *应用生态学报*, 1999, 10(2):135-139.