

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.04.004

马尾松林分结构对枯落物层和土壤层水文效应的影响

袁秀锦^{1,3}, 肖文发^{2,3}, 潘磊⁴, 王晓荣^{2,4}, 胡文杰⁴,
崔鸿侠⁴, 雷静品^{1,3*}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 3. 南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 4. 湖北省林业科学研究院, 湖北 武汉 430075)

摘要: [目的] 通过监测不同林分结构马尾松林枯落物层和土壤层的水文效应, 探究影响其效应的主要结构因子及相关关系, 为马尾松林抚育经营管理提供参数。[方法] 在三峡库区九岭头林场选取 9 块马尾松林样地, 调查其林分结构参数, 即叶面积指数、胸径、冠幅、角尺度、Marglrf 丰富度指数及林木竞争指数等, 分别采用室内浸泡法和环刀法对枯落物层和土壤层持水特性进行定量研究, 运用 Pearson 相关分析、主成分分析、冗余分析等方法分析林分结构对枯落物层和土壤层水文效应的影响及其相互关系。[结果] 林木竞争指数、叶面积指数、林分密度与土壤最大持水量和枯落物层总有效蓄水量呈显著正相关 ($P < 0.05$), Marglrf 丰富度指数与土壤最大持水量呈显著正相关, 而与枯落物层总有效持水量不相关。林分结构的变量组合分别解释了马尾松林枯落物层和土壤层水文效应的 54.06% 和 61.80%。[结论] 林分结构与枯落物层和土壤层水文效应密切相关, 即林木竞争力越强, 林木生长状况越好, 林分蓄积量越多, 枯落物层和土壤层的水文效应越好。

关键词: 林分结构; 水文效应; Pearson 相关分析; 主成分分析; 冗余分析

中图分类号: S715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1498(2020)04-0026-09

森林在地球生态系统中占有重要的地位, 在防风固沙、保持水土、涵养水源及净化水质等方面发挥着重要的作用^[1-2], 主要通过林冠截留、树干茎流、枯落物、土壤水文效应及林地蒸腾等方面调节水文过程。枯落物指自然界植物在生长发育过程中新陈代谢产物的总称, 是森林水文效应的第二功能层^[3-4], 其在防止土壤侵蚀, 降低地表径流方面具有重要的作用^[5-6]; 森林土壤对于保持森林生态功能具有重要的影响, 它作用于雨水渗透速率、转化及流域产流量和林地蒸散等生态水文过程^[7]。

枯落物层涵养水源能力的不同, 主要取决于枯落物其所在的森林类型、枯落物的分解程度、枯枝

落叶层贮量和厚度、及半分解层和分解层持水量等的差异^[8], 而土壤层的水文效应主要与土壤孔隙度、密度等物理性质, 以及 pH 值、养分含量、有机质等化学性质有关^[9-10], 不同林分类型的土壤物理性质存在差异, 导致土壤的持水量能力不同^[11], 一般针阔混交林土壤物理性质和持水量较纯林和阔叶林好^[10]。目前研究枯落物层和土壤层的水文效应主要集中在树种组成^[12]、林龄^[13]、林分密度^[14]等结构因子, 这些因子虽然容易测量, 但忽略了林分的水平及垂直结构, 选用多个结构参数及空间结构参数对枯落物层和土壤层水文效应影响的研究较少^[8]。

收稿日期: 2019-06-20 修回日期: 2019-08-05

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目 (2015BAD07B0403)

* 通讯作者: 雷静品, 博士, 研究员. 研究方向: 森林生态管理. E-mail: leijs@caf.ac.cn

林分结构可以被非空间结构定性表示, 如叶面积指数、生物量、分枝倾角等^[15-16], 这些参数代表林分冠层结构参数, 而不能代表整个林分结构。大小比数、角尺度、混交度等林分空间结构参数常用在森林经营中^[17], 但很少运用到森林水文中, 将林分结构综合参数与森林水文效应的关系结合起来进行研究的更少。哪些结构因子对枯落物层和土壤层水文效应影响比较显著, 及其影响程度如何尚不清楚, 因此, 本研究以三峡库区马尾松人工林为研究对象, 采用叶面积指数、林分密度、冠幅等非空间结构参数及大小比数、角尺度、林木竞争指数等空间结构参数, 研究林分结构与枯落物层及土壤层水文效应之间的关系, 寻找影响枯落物层及土壤层水文效应的主要结构因子, 为马尾松林分抚育经营管理提供技术参数。

1 研究地区与方法

1.1 研究地区概况

三峡库区九岭头林场 (30°59' N, 110°47' E, 海拔 1 752 030 m) 位于湖北省秭归县屈原镇西北方向, 处于中亚热带湿润季风气候区, 季节性明显, 形成春早、夏热、秋季多雨、冬季温暖等气候特征, 年均气温 15~18℃, 年均降水量 1 000~1 200 mm, 土壤类型主要为黄壤和黄棕壤。马尾松林是库区非常重要的防护林类型之一, 主要树种有马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、光皮桦 (*Betula lumini-fera* H. Winkl.)、香椿 (*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.) 等, 灌木主要有木姜子 (*Litsea pungens* Hemsl.)、粉花绣线菊 (*Spiraea japonica* L. f.)、白叶莓 (*Rubus*

innominatus S. Moore.) 等, 林下草本植物有茜草 (*Rubia cordifolia* L.)、珠芽狗脊 (*Woodwardia pro-lifera* Hook. et Arn.)、野青茅 (*Deyeuxia arundin-acea* (L.) Beauv.) 等。

1.2 样地设置与调查

2017年5月, 在三峡库区九岭头林场设置9块海拔一致 (1 170~1 262 m), 坡度相同 (32°), 且长期未经过人类干扰的马尾松人工林样地 (20 m×30 m), 以 10 m 为间隔将各个样地分割成 10 m×10 m 正方形的小样方, 对样地里所有>4 cm 的树木进行每木检尺, 包括: 树高 (H)、胸径 (DBH)、枝下高 (UB)、东西南北冠幅 (CW), 在 2017年7—9月, 利用 LAI-2200c 冠层分析仪 (LI-COR, 美国) 测定每个样地的叶面积指数, 并用全站仪记录每株树相对坐标 (x, y), 样地的基本信息见表 1。

1.3 枯落物层水文特征的测定

2017年8月中旬, 在每个小样地中采取梅花形取5个点, 每个点的面积为 50 cm×50 cm, 按照枯落物未分解和半分解状态划分层, 保持原样收集各层的枯落物, 随即带回室内称其自然质量, 在 65℃ 烘箱中烘制 48 小时至恒质量, 并称其质量, 以计算单位面积枯落物蓄积量。

枯落物持水量采用室内浸泡法^[11]。将烘干至恒质量的未分解层和半分解层的枯落物分别原状装入自制尼龙袋 (100 目尼龙材质), 浸入盛有清水的容器中, 浸泡 24 小时后直至枯落物达到饱和为止, 然后取出, 静置 5 分钟左右, 直至不滴水为止, 迅速称其湿质量, 计算枯落物的有效蓄水量^[18]。

表 1 标准地基本概况

Table 1 Basis information of sampling plots

样地编号 Plot No	坡向 Slope direction	海拔 Altitude/m	林分密度 Stand density/(Plants·hm ⁻²)	胸高断面积 Basal area/(m ² ·hm ⁻²)	平均胸径 DH/cm	平均树高 H/m
1	西北	1 232	933	31.88	18.96±8.77	13.40±3.48
2	西北	1 206	1 267	26.69	13.37±9.52	10.05±3.85
3	西北	1 189	1 933	50.58	13.32±9.35	11.03±4.60
4	西北	1 172	1 166	32.83	12.63±9.63	11.02±4.44
5	西北	1 170	1 217	26.42	11.85±7.90	9.55±3.23
6	西北	1 262	1 533	32.60	13.39±9.58	10.39±4.49
7	西北	1 217	1 283	30.01	14.18±10.02	10.86±3.86
8	西北	1 229	1 183	24.68	12.63±10.41	9.44±4.28
9	西北	1 236	1 183	40.63	18.95±8.92	13.54±4.03

1.4 土壤层水文特征的测定

在9块样地内选取代表性样点,每个样地内选取3个采样点,挖取土壤剖面,分别按0~10 cm、10~20 cm土层取样。采用100 cm³的标准环刀进行土壤含水量、土壤孔隙度和土壤密度的测定,测量方法参考中华人民共和国林业行业标准《森林土壤水文-物理性质的测定》(LY/T 1215—1999)^[19]。最后计算土壤非毛管持水量、毛管持水量和总持水量^[20]。

1.5 结构特征参数

(1) 林层指数(S)

林层指数是描述林层垂直结构的指标,反映林层的垂直分布格局及林层多样性^[21]。

(2) 开敞度(K)

开敞度是一个与随机样点相对应的反应光环境的测度指标^[22]。

(3) 林木竞争指数(CI)

林木竞争指数反映的是林分对环境资源需求与现实生境中林木对环境资源占有量之间的关系^[23]。

(4) 水平分布格局

林分水平分布格局选取林木空间分布密度(D)^[24]和角尺度(W)^[25]两个指标。

(5) 大小比数(U)

大小比数反映的是林木大小的分化程度^[25]。

(6) 混交度(M)

混交度用来反映树种隔离程度的指标^[25],其值越大表明树种混交程度越高。

(7) 乔木丰富度(R')

Margalef丰富度指数代表树木物种多样性^[26]。

1.6 数据处理

对林分结构与枯落物层和土壤层水文效应进行pearson相关分析;采用主成分分析(Principal component analysis, PCA)对林分结构进行降维分析。

采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)探究水文效应与因子分析得出的结构参数的关联性。首先对水文特征因子进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),确定适合的分析方法,结果显示几个排序轴中最大的梯度长度小于3,可以采用线性响应模型进行冗余分析。最后采用蒙特卡罗法检验林分结构和降雨分配的各个指标相关的显著性,根据决定系数R²判断不同根特征变化的主要影响因子。

以上分析运用SPSS Statistics 20和R 3.3.2软件的“vegan”程序包中完成。绘图在SigmaPlot12.5中完成。

2 结果及分析

2.1 马尾松林林分结构特征统计结果分析

林分结构通过影响生物因子和林内环境,在森林生态系统服务功能方面具有重要的影响^[8]。本研究选取的马尾松空间结构参数有角尺度、大小比数和混角度等8个,非空间结构参数有冠层厚度、叶面积指数、胸高断面积等5个。13个林分结构因子中,变异系数最小为空间密度指数,其变异系数值为3.9%,变异系数最大的为混交度,其变异系数数值为51.50%(表2)。

2.2 枯落物层及土壤层水文特征

浸泡法是最常用的模拟降雨的方法,所得枯落物持水特性并不能代表自然降水条件下枯落物的蓄水能力,因此常用有效拦蓄量表示枯落物的降水拦蓄能力^[18]。本研究得出,枯落物半分解层的有效蓄水量高于未分解层有效蓄水量,枯落物层总有效蓄水量均值为10.17 t·hm⁻²,变幅为8.34~15.13 t·hm⁻²,变异系数为21.13%。森林的水源涵养能力,一部分取决于森林土壤状况,森林最大蓄水能力反应土壤的总蓄水能力,非毛管持水量反应土壤调节水分能力^[27],土壤层的毛管持水量(391.97 t·hm⁻²)远远大于非毛管持水量(58.15 t·hm⁻²),最大持水量为450.12 t·hm⁻²,变幅为405.96~478.86 t·hm⁻²,变异系数为4.75%(表3)。

2.3 马尾松林林分结构与枯落物层及土壤层相关性

对各样地内林分结构与枯落物层及土壤层进行Pearson相关性分析和检验,结果表明土壤层的非毛管持水量随着林分密度增加而变大,两者呈显著正相关关系($P<0.05$),与林层指数、开敞度显著负相关($P<0.05$),毛管持水量与垂直异质性、开敞度、Marglrf丰富度指数显著正相关($P<0.05$),与角尺度和大小比数显著负相关($P<0.05$),土壤最大持水量与林木竞争指数、叶面积指数、林分密度、Marglrf丰富度指数显著正相关($P<0.05$);枯落物层的未分解层有效蓄水量与叶面积指数、林分密度、林木竞争指数显著正相关($P<0.05$),半分解层有效蓄水量与平均冠层厚度显著正相关

表2 马尾松林分结构特征统计

Table 2 Statistical table of structural characteristics of *Pinus massoniana* Lamb. forest

项目 Items	均值 Mean value	变幅 Range	变异系数 CV/%
垂直异质性 Vertical heterogeneity	0.30±0.04	0.27~0.36	11.61
林层指数 Storage index	0.14±0.03	0.11~0.19	22.10
开敞度 Open degree	0.24±0.03	0.2~0.29	11.82
林木竞争指数 Competition index	1.60±0.14	1.43~1.87	8.87
林木空间密度指数 Spatial density index	0.81±0.03	0.75~0.86	3.90
冠层厚度 Canopy thickness	5.47±0.72	4.45~6.72	13.22
角尺度 Uniform angle index	0.51±0.03	0.46~0.57	6.50
大小比数 Neighbourhood comparison	0.51±0.04	0.46~0.58	8.25
混交度 Mingling	0.88±0.46	0.56~1.90	51.50
叶面积指数 Leaf area index	5.51±1.34	3.52~6.91	24.37
林分密度 Stand density	1 414.81±297.96	933.33~1 850.00	21.06
基面积 Basal area	32.04±4.45	25.5~39.22	13.88
总冠幅 Canopy crown	20 557.62±4 272.13	16 055.28~29 344.22	20.78
Marglrf丰富度指数 Marglrf richness index	3.46±0.59	2.67~4.43	16.99

表3 马尾松林下枯落物层及土壤层水文特征

Table 3 The hydrological character of litter layer and soil layer in *P. massoniana*

水文因子 Hydrological factor		均值 Mean value	变幅 Range	标准差 SD	变异系数 CV/%
枯落物层有效蓄水量 The effective interception of litter/(t·hm ⁻²)	未分解层 Under-composed layer	4.21	2.59~8.63	1.93	45.73
	半分解层 Semi-decomposed layer	5.96	5.16~6.50	0.36	6.12
	总 Total	10.17	8.34~15.13	2.15	21.13
土壤层持水量 Soil water holding capacity/(t·hm ⁻²)	非毛管 Non-capillary	58.15	26.86~87.36	21.55	37.05
	毛管 Capillary	391.97	360.53~419.70	19.55	4.99
	最大持水量 Maximum	450.12	405.96~478.86	21.39	4.75

($P<0.05$), 与林层指数、开敞度显著负相关 ($P<0.05$), 枯落物层总有效蓄水量与叶面积指数、林分密度、林分竞争指数显著正相关 ($P<0.05$) (表4)。综上所述, 林分竞争指数、叶面积指数、林分密度对枯落物层及土壤层的持水量具有显著影响。

2.4 林分结构综合参数与枯落物层水文效应的关系

与冠层水文分析方法相同, 运用主成分分析法进行林分结构参数降维分析, 采用 KMO 量度筛选变量。剔除共线性变量后, 保留平均冠层厚度、林层指数、林分密度、胸高断面积和、林木竞争指数、混交度、Marglrf 丰富度指数 7 个变量, KMO 值为 5.14, 符合基本要求。对保留的 7 个变量进行主成分分析, 选取特征值大于 1 的主成分, 其主成分分析表及旋转因子载荷表见表 5 和表 6。

从表 5 和表 6 可以看出, 特征值大于 1 的主成分共有 3 个, 第一主成分中, 林分密度、林木竞争指数、林层指数和乔木 Marglrf 丰富度指数, 分别表示林分的稀疏程度、林木所受的竞争压力、垂直结构复杂性及物种多样性, 这些变量部分是由林分竞争后的结果, 反映林分的竞争状况, 而林分密度、胸高断面积和总体体现林木的蓄积量大小, 因此将第一类因子定义为林木竞争状况及蓄积量, 第二主成分主要为冠层厚度、胸高断面积和所占载荷量较大, 因此将这类主成分定义为生长因子, 第三主成分主要为混交度及林层指数, 因此将这类主成分定义为种间隔离程度及垂直结构复杂性。

将得出的林分结构综合参数与枯落物的水文效应进行冗余分析, RDA 排序图较好的反映林分结构结合参数与枯落物层水文功能之间的关系 (图 1),

表4 林分结构与枯落物层及土壤层相关分析

Table 4 Correlation analysis between forest structure characteristics and litter layer and soil layer

变量 Variables	土壤层持水量 Soil water holding capacity			枯落物层有效蓄水量 The effective interception of litter		
	非毛管 Non-capillary	毛管 Capillary	最大持水量 Maximum	未分解层 Under-composed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	总有效蓄水量 Total
垂直异质性 Vertical heterogeneity	-0.47	0.70*	0.16	-0.17	-0.49	-0.23
林层指数 Storage index	-0.73*	0.174	-0.57	-0.35	-0.68*	-0.43
开敞度 Open degree	-0.67*	0.67*	-0.06	-0.17	-0.70*	-0.27
林木竞争指数 Competition index	0.61	0.32	0.91*	0.75*	0.36	0.73*
林木空间密度指数 Spatial density index	0.16	0.49	0.61	0.11	0.14	0.12
冠层厚度 Canopy thickness	0.37	-0.39	0.02	0.39	0.67*	0.46
角尺度 Uniform angle index	-0.32	0.29	-0.06	0.06	-0.17	0.03
大小比数 Neighbourhood comparison	0.28	-0.72*	-0.38	-0.10	0.06	-0.08
混交度 Mingling	0.28	-0.69*	-0.35	-0.48	-0.11	-0.45
叶面积指数 Leaf area index	0.24	0.63	0.82**	0.73*	0.09	0.67*
林分密度 Stand density	0.67*	0.26	0.91**	0.70*	0.55	0.72*
基面积 Basal area	0.28	-0.26	0.04	0.16	0.53	0.24
总冠幅 Canopy crown	0.23	0.34	0.55	0.20	-0.01	0.17
MargItf丰富度指数 MargItf richness index	0.05	0.74*	0.74*	0.59	-0.05	0.52

表5 林分结构主成分分析

Table 5 Principal component analysis for forest structural characteristics

主成分 Principal component	特征值 Eigen value	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate /%
1	3.54	50.60	50.60
2	1.50	21.45	72.05
3	1.22	17.40	89.50

表6 旋转后林分结构因子载荷

Table 6 The loading values of forest structure factors after rotation

因子意义 Meaning of factors	I 林分竞争状况及蓄积量 Forest competition status factor and forest volume	II 生长因子 Growth factor	III 垂直结构及种间隔离程度 Vertical structure and degree of isolation between species
冠层厚度 Canopy thickness	0.448	0.781	0.325
林层指数 Storage index	-0.651	-0.162	0.634
林分密度 Stand density	0.932	-0.033	-0.25
胸高断面面积 Basal area	0.736	0.578	0.157
林木竞争指数 Competition index	0.837	-0.347	-0.205
混交度 Mingling	-0.529	0.249	-0.723
MargItf丰富度指数 MargItf richness index	0.726	-0.589	0.240

实线表示林分结构因子，虚线表示枯落物层的各个水文特征因子，枯落物层水文功能被这三类结构总参数解释了 54.06% ($P<0.05$)，为了找出枯落物层的水文因子主要影响因素，在上述分析的基础

上，又做了蒙特卡洛检验。检验结果表明：未分解层有效蓄水量和枯落物总有效蓄水量主要受第一类结构参数显著影响 ($P<0.05$)，即树木之间竞争越激烈，乔木层蓄积量越大，枯落物水文功能越强，

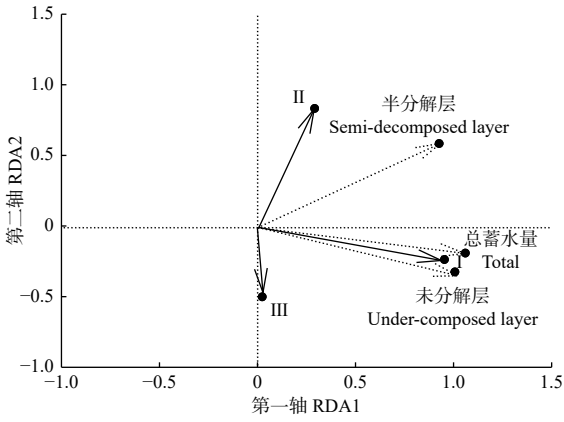


图1 枯落物层水文效应和林分结构因子的冗余分析
Fig. 1 Redundancy analyses (RDAs) calculated from forest structure characteristics and litter hydrological process

而半分解层的有效蓄水量没有找到与之相关的显著影响因子, 这可能受气象因子、生物因子影响有关。

2.5 林分结构综合参数与土壤层水文功能的关系

KMO 检验筛选后, 保留 8 个结构因子, 即: 林木竞争指数、林层指数、胸高断面积和角尺度、叶面积指数、总冠幅、Margltf 丰富度指数、林分密度, 此时 KMO 值为 0.503, 达到基本要求。在

第一主成分中, 林木竞争指数、叶面积指数、Margltf 丰富度指数、总冠幅、林分密度的载荷绝对值最大, 其中叶面积指数、总冠幅表示树木的生长状况, 而林分的稀疏程度、树种多样性与林木所受竞争压力有关, 因此将第一主成分定义为竞争状况及生长因子, 第二主成分中, 林层指数、胸高断面积和所占载荷量最大, 因此将此主成分定义为垂直结构及蓄积量, 第三主成分以混交度所占的绝对值载荷量最大, 因此将此主成分定义为种间隔离程度 (表 7, 表 8)。

林分结构综合参数与土壤层水文功能冗余分析结果表明, 土壤层水文功能被林分结构综合参数解释了 61.80% ($P < 0.05$) (图 2), 其中实线表示林分结构因子, 虚线表示枯落物层的各个水文特征因子, 由图可以看出, 最大持水量与第一类结构综合参数夹角最小, 这说明最大持水量与林木竞争因子及生长因子相关性最强, 非毛管持水量和毛管持水量分别与第二类和第三类结构参数夹角最小, 经过蒙特卡洛检验过后, 第一类结构参数对于土壤层最大持水量具有显著的影响 ($P < 0.05$), 即林木竞争越激烈, 林木生长因子越好, 土壤层最大持水量越

表 7 林分结构主成分分析

Table 7 Principal component analysis for forest structural characteristics

主成分 Principal component	特征值 Eigen value	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	4.39	54.89	54.89
2	1.56	19.49	74.38
3	1.04	13.01	87.39

表 8 旋转后林分结构因子载荷

Table 8 The loading values of forest structure factors after rotation

因子意义 Meaning of factors	I 林木竞争状况及生长因子 Forest competition status factor and growth factor	II 垂直结构及蓄积量 Vertical structure and forest volume	III 种间隔离程度 Degree of isolation between species
林木竞争指数 Competition index	0.900	-0.010	-0.307
林层指数 Storage index	-0.562	-0.671	0.343
平均混交度 Minglings	-0.585	0.338	-0.662
叶面积指数 Leaf area index	0.944	-0.258	-0.003
基面积 Basal area	-0.075	0.766	0.615
总冠幅 Canopy area	0.721	0.062	0.031
Margltf 丰富度指数 Margltf richness index	0.886	-0.349	0.099
林分密度 Stand density	0.850	0.465	0.024

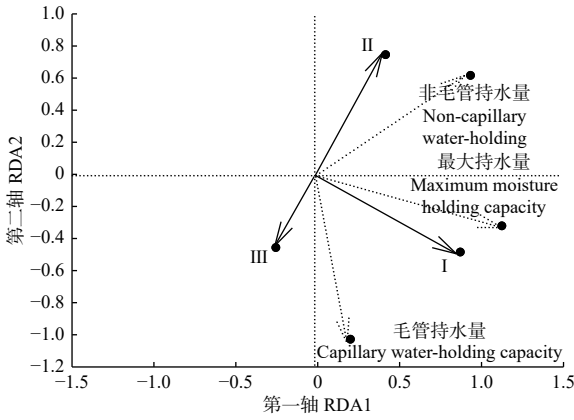


图2 枯落物层水文效应和林分结构因子的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analyses (RDAs) calculated from forest structure characteristics and soil hydrological process

大，而三类结构参数对于土壤层非毛管持水量和毛管持水量的影响不显著 ($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 林分结构与枯落物层效应关系分析

枯落物层的水文效应主要与枯落物储量及厚度、枯落物的分解状况等有关^[28]，而枯落物储存量受枯落物类型、微生物和地表的时间影响外，还受自身特性、外部环境和林分结构、林分类型的影响^[29-30]。如 Liu 等得出灌木和枯落物截留能力与水平异质性指数呈显著正相关关系^[31]。本研究得出马尾松林枯落物层的未分解层有效蓄水量与叶面积指数、林分密度、林木竞争指数显著正相关 ($P<0.05$)，半分解层有效蓄水量与平均冠层厚度显著正相关 ($P<0.05$)，与林层指数、开敞度显著负相关 ($P<0.05$)，枯落物层总有效蓄水量与叶面积指数、林分密度、林分竞争指数显著正相关 ($P<0.05$)。枯落物蓄积量主要由枯枝落叶组成，叶面积指数、林分密度越大，枯落物的蓄积量越大，因此枯落物的有效持水能力越强^[32]。林木竞争与林分密度息息相关，林木竞争越激烈，说明林分密度越大，从而使枯落物蓄积量越多，枯落物的持水能力越强^[33]。单个参数对解释森林结构有局限性，因此无法很好地解释林分结构与水文效应的关系，多参数分析可以更全面，更科学准确地描述林分结构，进一步分析与其他因子之间更可靠的结果。采用冗余分析方法分析林分结构的变量组合与马尾松林枯落物层水文效应之间的关系，结果表明枯落物层水文效应能被林木竞争状况及蓄积量、生长因子、种间隔离程

度及垂直结构复杂性三类结构总参数解释了 54.06% ($P<0.05$)，蒙特卡洛检验结果表明：未分解层有效蓄水量和枯落物总有效蓄水量主要受第一类结构参数显著影响 ($P<0.05$)，即树木之间竞争越激烈，乔木层蓄积量越大，枯落物水文功能越强。

3.2 林分结构与土壤层水文关系分析

土壤持水性能与土壤孔隙度有关，土壤中毛管孔隙中的水分越大，土壤保水能力越强，有利于植物根系吸收和土壤蒸发^[34]，非毛管空隙越大，土壤蓄水能力越强，能迅速容纳降水并及时下渗，有利于涵养水源^[35]。有研究表明土壤物理性质与林分结构相关性较大^[35]，毛管持水量与垂直异质性、开敞度、Marglft 丰富度指数显著正相关 ($P<0.05$)，与角尺度和大小比数显著负相关 ($P<0.05$)，马尾松林混交度越低，垂直结构越复杂，其透光性越好，越利于林下层植被的生长，林下物种多样性增加，对土壤的水源涵养功能具有一定的影响^[36]，土壤最大持水量与林木竞争指数、叶面积指数、林分密度、Marglft 丰富度指数显著正相关 ($P<0.05$)；除了 Marglft 丰富度指数外，与枯落物层水文效应与林分结构相关关系保持一致，这说明土壤层的持水特征与枯落物层有关，枯落物层越厚，其土壤表面含有的腐殖质和有机质越多，土壤越疏松，土壤层持水能力越好^[18,37]。采用冗余分析方法分析林分结构的变量组合与马尾松林土壤层水文效应之间的关系，土壤层水文功能被林分结构综合参数解释了 61.80% ($P<0.05$)，土壤层最大持水量与林木竞争因子及生长因子相关性最强。

4 结论

(1) 单个林分结构因子分析中，林木竞争指数、叶面积指数、林分密度与土壤最大持水量和枯落物层总有效蓄水量显著正相关 ($P<0.05$)，Marglft 丰富度指数与土壤最大持水量显著正相关 ($P<0.05$)，而与枯落物层总有效持水量不相关。

(2) 林分结构的变量组合分别解释了马尾松林枯落物层水文效应和土壤层水文效应的 54.06% 和 61.80%，说明林分结构与枯落物层和土壤层水文效应密切相关，即林木竞争力越强，林木生长状况越好，林分蓄积量越多，枯落物层和土壤层的水文效应越好。

参考文献:

- [1] Ryel R J, Leffler A J, Peek M S, *et al.* Water conservation in artemisia tridentata through redistribution of precipitation[J]. *Oecologia*, 2004, 11(2): 335-345.
- [2] Black P E. Research issues in forest hydrology[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 34(4): 723-728.
- [3] Liu P, Wang Q, Bai J, *et al.* Decomposition and return of C and N of plant litters of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in typical wetlands of the Yellow River Delta, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1717-1726.
- [4] 韩路,王海珍,吕瑞恒,等.塔里木河上游不同森林类型枯落物的持水特性[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 96-101.
- [5] Vitale M, Savi F, Daniela B, *et al.* Modeling of early stage litter decomposition in Mediterranean mixed forests: functional aspects affected by local climate[J]. *Journal of Biogeosciences and Forestry*, 2014, 8(4): 517-525.
- [6] 魏强,张广忠,凌雷,等.甘肃兴隆山主要森林类型凋落物及土壤层的蓄水功能[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2013, 37(2): 78-84.
- [7] 吕刚,张由松,祝业平.老秃顶子自然保护区不同森林类型土壤贮水与入渗特征研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 109-113.
- [8] 肖文娅,周琦,董务闯,等.苏州太湖流域2种水源涵养林空间结构特征与枯落物持水特性研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 21-25.
- [9] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等.渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [10] 刘洁,李贤伟,纪中华,等.元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. *生态学报*, 2011, 31(8): 2331-2340.
- [11] 刘少冲,段文标,陈立新.莲花湖库区几种主要林型水文功能的分析和评价[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 79-83.
- [12] 王晓荣,唐万鹏,刘学全,等.丹江口湖北库区不同林分类型枯落物储量及持水性能[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 244-248.
- [13] 王骄洋,王卫军,姜鹏,等.华北落叶松人工林林分密度对枯落物层持水能力的影响[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 66-70.
- [14] 赵磊,王兵,蔡体久,等.江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 203-208.
- [15] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow interception effect of forest type, ground cover and climate[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(16/17): 2903-2920.
- [16] Levia D F, Michalzik B, Nathe K, *et al.* Differential stemflow yield from European beech saplings: the role of individual canopy structure metrics[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(1): 43-51.
- [17] 赵洋毅,王克勤,陈奇伯,等.重庆缙云山自然保护区马尾松阔叶树混交林的空间结构特征[J]. *林业资源管理*, 2012, (1): 48-53.
- [18] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 55-63.
- [19] 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.
- [20] 胡淑萍,余新晓,岳永杰.北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 146-150.
- [21] 吕勇,臧颖,万献军,等.基于林层指数的青桐混交林林层结构研究[J]. *林业资源管理*, 2012(3): 81-84.
- [22] 沈海龙,丛健,张鹏,等.开敞度调控对次生林林冠下红松径高生长量和地上生物量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2781-2791.
- [23] 惠刚盈,胡艳波,赵中华,等.基于交角的林木竞争指数[J]. *林业科学*, 2013, 49(6): 68-73.
- [24] 惠刚盈, K. v. Gadow, 胡艳波,等.林木分布格局类型的角尺度均值分析方法[J]. *生态学报*, 2004, 24(6): 1225-1229.
- [25] 惠刚盈, K. v. Gadow, 胡艳波.林分空间结构参数角尺度的标准角选择[J]. *林业科学研究*, 2004, 17(6): 687-692.
- [26] 刘尧尧,辜彬,王丽.北川震后植被恢复工程植物群落物种多样性及优势种生态位[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 309-320.
- [27] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山华山松(*Pinus armandii*)林降雨再分配及其空间变异特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 76-85.
- [28] 赵洋毅.缙云山水源涵养林结构对生态功能调控机制研究[D].北京,北京林业大学, 2011.
- [29] 袁秀锦,王晓荣,潘磊,等.三峡库区不同类型马尾松林枯落物层持水特性比较[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 160-166.
- [30] 贾剑波,刘文娜,余新晓,等.半城子流域3种林地枯落物的持水能力[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 26-32.
- [31] Liu J, Zhang Z, Zhang M. Impacts of forest structure on precipitation interception and run-off generation in a semiarid region in northern China[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(15): 2362-2376.
- [32] 郑桂莲,宫殿婷,王焱.半城子流域油松林分枯落物蓄积量及持水特征[J]. *林业资源管理*, 2018(1): 44-49.
- [33] 曾思齐,肖化顺,刘发林.木荷与苦槠次生林技术研究[M].北京:中国林业出版社, 2015, 91-92.
- [34] 鲁绍伟,高琛,李少宁,等.北京市松山不同海拔油松林枯落物及土壤水文效应[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(1): 1-6.
- [35] 孟楚,郑小贤,王威.北京八达岭林场水源涵养林林分结构与土壤的相关性研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 99-105.
- [36] 周晓果,温远光,朱宏光,等.大明山常绿阔叶林冠层垂直结构与林下植物更新[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 367-374.
- [37] 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.

Effect of *Pinus massoniana* Stand Structure on Hydrological Effects of Litter Layer and Soil Layer

YUAN Xiu-jin^{1,3}, XIAO Wen-fa^{2,3}, PAN Lei⁴, WANG Xiao-rong^{2,4},
HU Wen-jie⁴, CUI Hong-xia⁴, LEI Jing-pin^{1,3}

(1. Key Laboratory of Forest Silviculture of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 4. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430075, Hubei, China)

Abstract: [Objective] By monitoring the hydrological effects of litter layer and soil layer of *Pinus massoniana* forest with different stand structure, the main structural factors and their correlations were explored. [Method] In this study, nine *P. massoniana* forest plots were selected from Julingtou Forest Farm in the Three Gorges Reservoir area to investigate the stand structure parameters, such as leaf area index, DBH, crown width, angle scale, Marglrf richness index and forest competition index, etc. The water-holding characteristics of the litter layer and the soil layer were quantitatively studied by the indoor soaking method and the ring knife method, respectively. Pearson correlation analysis, principal component analysis, redundant analysis and other methods were used to analyze the relationship between stand structure and hydrological effects of litter layer and soil layer. [Result] The results showed that the forest competition index, leaf area index and stand density were significantly positively correlated with the maximum water holding capacity of the soil and the total effective water storage capacity of the litter layer ($P < 0.05$). The Marglrf richness index was significantly positively correlated with the maximum water holding capacity of the soil, but not with the total effective water holding capacity of the litter layer. The variable combination of stand structure explained 54.06% and 61.80% of the hydrological effects of the litter layer and soil layer of *P. massoniana* forest, respectively. [Conclusion] The stand structure is closely related to the hydrological effects of the litter layer and the soil layer, that is, the stronger the forest tree competitiveness, the better the forest growth condition, the more the stand accumulation amount, the better the hydrological effect of the litter layer and the soil layer.

Keywords: stand structure; hydrological effect; Pearson correlation analysis; principal component analysis; redundancy analysis

(责任编辑: 崔 贝)