

间伐强度对秦岭南坡锐齿栎林土壤水文特性的影响

李侃^{1,3}, 张胜利^{2,3*}, 孟庆旭¹

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100;
3. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西 杨陵 712100)

摘要:在秦岭南坡中山地带,选择有代表性的锐齿栎林样地,按照间伐强度为5%、10%、15%和20%进行间伐,并与未间伐样地进行对照,就间伐强度对锐齿栎林土壤水文特性的影响进行研究。结果表明,间伐2 a后,各间伐样地土壤容重显著大于对照样地($p < 0.05$),总孔隙、毛管孔隙则显著小于对照样地($p < 0.05$),5%间伐样地土壤非毛管孔隙大于对照样地,其他间伐样地小于对照样地。随着间伐强度的增加,土壤容重显著增大($p < 0.05$),毛管孔隙、非毛管孔隙、总孔隙度显著下降($p < 0.05$),且间伐活动对A层土壤容重的影响大于B层。各间伐样地土壤的自然持水量、毛管持水量、最小持水量和最大持水量显著低于对照样地($p < 0.05$),随着间伐强度的增大,土壤的自然持水量、毛管持水量、最小持水量和最大持水量显著下降($p < 0.05$)。在各间伐样地中,5%土壤的渗透系数最大,随间伐强度的增大,各间伐样地渗透性能持续下降。基于主成分分析,锐齿栎林对照样地土壤水文功能最优,其次为5%间伐样地。土壤持水量与毛管孔隙和总孔隙有显著正相关($p < 0.05$),与土壤容重有显著负相关($p < 0.05$);渗透系数与非毛管孔隙有显著正相关($p < 0.05$),与土壤容重有显著负相关($p < 0.05$)。

关键词:锐齿栎林;间伐强度;持水能力;渗透性能

中图分类号:S718.512.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2015)02-0008-07

Effect of Thinning Intensity on Soil Hydrological Characteristics of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in the South Slope of Qinling Mountains

LI Kan^{1,3}, ZHANG Sheng-li^{2,3*}, MENG Qing-xu³

(1. Institute of Soil and Water conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to understand the influence of thinning intensity on soil hydrological characteristics of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*, sampling plots were established on the he south-facing slope with medium-altitude of Qinling Mountains. The plots were thinned with the intensities of 0% (control), 5%, 10%, 15%, and 20%. The results indicated that the soil bulk density of thinned plots were higher than those of the control ($p < 0.05$), while the reverse result was observed on the total porosity and capillary porosity ($p < 0.05$). The non-capillary porosity of thinning intensity at 5% was higher than the control, and other thinned plots were reverse. With the increased of thinning intensity, the soil bulk density increased significantly ($p < 0.05$), and the capillary porosity, non-capillary porosity, and total porosity decreased significantly ($p < 0.05$). The influence of thinning management to the soil bulk density of "A layer" was more significant than "B layer". The natural water holding-capacity, capillary water-holding ca-

收稿日期:2014-05-14 修回日期:2014-08-13

基金项目:国家林业局林业公益性行业科研专项(201004036)。

作者简介:李侃,男,硕士,研究方向:水土保持工程与森林水文。E-mail:172716092@qq.com

*通信作者:张胜利,男,博士,副教授,研究方向:水土保持工程与森林水文。E-mail:victory6515@sina.com

capacity, minimum water-holding capacity and maximum water-holding capacity of thinned plots were lower than the control ($p < 0.05$). With the increase of thinning intensity, significant decreases ($p < 0.05$) were recorded in the natural water holding-capacity, capillary water-holding capacity, minimum water-holding capacity and maximum water-holding capacity. The permeability value of thinning intensity at 5% was higher than the control. With the increase of thinning intensity, permeability value decreased. Based on principal component analysis, the comprehensive hydrological effect of un-thinned plot was the best. The 5% thinning intensity treatment is recommended considering the comprehensive hydrological effect among the four thinning levels. The soil water-holding capacities were positively correlated ($p < 0.05$) with the capillary porosity and total porosity, but negatively with soil bulk density ($p < 0.05$). The permeability were positively correlated ($p < 0.05$) with non-capillary porosity, but negatively with soil bulk density ($p < 0.05$).

Key words: *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest; thinning intensity; soil water-holding; permeability

秦岭南坡中山地带是南水北调中线工程的重要水源区^[1], 该区森林对调水水量和水质的影响极为关键。合理的森林经营与管理措施是森林健康发展重要保证之一。秦岭南坡中山地带面积约 1.5 万 km², 且多被森林覆盖, 经过 20 世纪 60、70 年代的大量采伐, 现多为天然次生林, 并已进入中龄林阶段, 林木生长受限。从加速林木直径生长、提高经济效益和碳汇量、促进林木结实为天然更新创造良好条件等方面考虑, 需要进行合理间伐。关于间伐对森林生态系统的影响, 很多人对此也进行过探讨, 如间伐对林分生长^[2]、总收获量^[3]、林分结构^[4]、营养归还^[5]、林下植被生物量^[6]、森林环境及生物多样性的影响^[7]等, 但就间伐对森林径流及水质的影响研究, 却并不多见。秦岭南坡森林的作用举足轻重, 已有许多学者对该地区不同森林类型下林地的水源涵养功能、径流及水质的变化规律进行了研究^[8-10], 但间伐及其强度对径流及水质的影响目前尚不清楚, 因此急需就此进行全面研究。锐齿栎林是秦岭南坡主要林分之一, 本研究就间伐强度对锐齿栎林土壤的水文特性影响进行分析探讨, 旨在为间伐及其强度对径流量及其产汇流过程, 以至水质的影响研究, 提供部分基础性的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地选在秦岭南坡中山地带的火地塘林区, 林区地处 33°25′—33°29′N、108°25′—108°30′E 之间, 行政区划隶属陕西省宁陕县, 火地塘属秦岭南坡山地温带气候。林区年均气温 8~10℃; 年积温 2 200~3 100℃; 年均降水量 1 000~1 200 mm, 多集中在 7、8 月份; 年均蒸发量 800~950 mm; 年总日照时数为 1 100~1 300 h; 无霜期 199 d; 相对湿度 77.1%。

这种雨热同期的气候, 有利于林木的生长发育。林区总面积为 2 037 hm², 其中林业用地 201 hm²; 非林业用地 20 hm²。在林业用地中, 有林地 1 870 hm², 疏林地 106 hm², 苗圃地 4 hm², 无林地 37 hm², 森林覆盖率 91.8%。从低海拔到高海拔依次为: 松栎林亚带, 松桦林亚带, 云杉、冷杉针阔叶混交林亚带。主要成林树种有: 锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、华山松 (*Pinus armandii*)、红桦 (*Betula albo-sinensis*)、光皮桦 (*Betula lumini fem*)、青杆 (*Picea wilsonii*)、巴山冷杉 (*Abies fargesii*) 和山杨等。植被分布具有明显的垂直地带性, 主要为寒温性针阔混交林带和松栎混交林带。林区土壤以山地棕壤土为主, 土层厚 30~50 cm, 多发育在花岗岩、片麻岩残积、坡积母质上。

陕西秦岭南坡中山地带既是陕西秦岭南坡天然林的主要分布区, 也是南水北调中线工程的关键和核心水源林区, 火地塘林区位于陕西秦岭南坡中山地带的中段, 其森林植被、地形地貌、土壤、气候等具有秦岭南坡中山地带的典型特征, 故将试验地选择在该林区具有较好的代表性。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 依据有较好代表性的原则, 在试验地选择林相基本一致的锐齿栎林, 在其内设置 20 m×30 m 的样地, 分别是间伐强度为 5%、10%、15%、20% 的样地和对照样地 (未间伐) 共 5 个, 无重复。间伐前, 先对样地进行调查, 然后进行抚育间伐设计, 遵循被伐木应为生长不良、感染病虫害和过密的林木等技术要求, 于 2010 年 4—5 月对样地进行抚育间伐; 间伐后, 剩余物散铺于样地内, 以恢复森林生态环境。样地基本情况见表 1。

表 1 间伐前样地基本情况

Table 1 The basic situation of pre-thinning plots

样地	海拔 /m	坡度 /(°)	坡向	坡位	土壤厚度 /cm	平均胸径 /cm	平均树高 /m	枝下高 /m	平均冠幅 /m	郁闭度/%	林分密度 /(棵·hm ⁻²)
对照	1 590	20	半阴坡	中	60	15.72	14.36	6.80	2.32×2.99	70	1 501
5%间伐	1 640	37	阴坡	中	55	10.93	10.68	6.45	1.97×2.44	80	1 483
10%间伐	1 620	32	半阴坡	中	54	10.78	10.06	5.76	2.01×2.35	80	1 450
15%间伐	1 617	25	阴坡	下	52	15.57	16.27	7.82	2.15×2.50	80	1 450
20%间伐	1 600	29	阴坡	下	52	15.48	15.08	9.25	2.21×2.51	80	1 433

1.2.2 土壤水文物理性质指标选择 森林土壤可自然形成发达的层次,为详细了解间伐强度对锐齿栎林土壤水文特性的影响,研究主要针对土壤 A 层和 B 层分别进行探讨。土壤水文物理性质指标选为土壤容重、孔隙度、土壤持水量和渗透系数。

1.2.3 土样采集及土壤水文物理性质指标的测定

土样采集工作于 2012 年 10 月进行。每个样地布设 3 个土样采集点,分别位于样地的上部、中部和下部,且未经扰动。采样前,先剥去采样点处土壤表层枯枝落叶,再挖土壤剖面,并对剖面进行整修,测量土壤 A、B 层厚度,每个点 A、B 层各采集 2 个土样,重复 3 次,共计 12 个土样。采样时,用环刀(直径 50 mm、高 50.46 mm)自上而下在土壤 A 层、B 层中心部位分别取样。土样运回实验室后,按照测定要求对样品进行处理,等待测定。

参照国家林业行业标准《森林土壤水分—物理性质的测定》(LY/T1215-1999)测定及计算土壤容重、孔隙度和土壤持水量。土壤渗透系数采用室内定水头单环有压入渗法^[11]定量测定土壤渗透系数,为了便于比较,将不同温度下测定的渗透系数 K 值换算为 10℃ 时的渗透系数,计算方法参照国家标准《森林土壤渗透性的测定》(GB7838-87)。

1.2.4 数据处理 采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据处理和作图,采用 SPSS. 17.0 软件对数据进行描述统计和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 间伐强度对土壤的水文物理性质的影响

2.1.1 对土壤容重和孔隙度的影响 土壤容重是表示土壤的松紧程度及孔隙状况一个重要指标,间接反映土壤的蓄水、透水性^[12]。间伐 2 a 后,土壤容重变化明显,随着间伐强度的增加,A 层和 B 层土壤容重逐渐增加。与对照样地相比,4 种间伐强度样地 A 层土壤容重分别增加 14.16%、28.04%、45.07%、47.34%;B 层土壤分别增加 10.47%、17.46%、27.97%、34.69%,且 A 层土壤增大率显著大于 B 层($p < 0.05$) (表 2),说明间伐活动对 A 层土壤容重影响程度大于 B 层,这是因为间伐活动

对森林土壤的扰动首先发生于地表的缘故。锐齿栎林各样地地处密林深处,除间伐外,几乎不存在其他人类活动的影响,故各间伐样地 A、B 层土壤容重均大于对照样地极有可能是间伐作业过程中对样地的人为扰动所致。2 a 后,各间伐样地 A、B 层土壤容重仍大于对照样地说明秦岭林区锐齿栎林土壤对间伐活动引起的扰动较为敏感,且间伐对土壤结构的影响可能长期延续。因此间伐活动对锐齿栎林土壤渗透性的影响也将长期存在,不利于水分的下渗和壤中流的产生。随间伐强度的增大,(A+B)层土壤容重显著增加($p < 0.05$),锐齿栎林样地(A+B)层土壤容重有随之增大的趋势,也就是说随着间伐强度的增大,锐齿栎林土壤透水性有可能随之降低,且这种影响可能持续时间较长。

对森林生态系统而言,毛管孔隙度的大小反映了森林土壤保持水分的能力;非毛管孔隙度的大小反映了森林植被滞留水分、发挥涵养水源和削减洪水的能力^[13]。间伐 2 a 后,随间伐强度的增大,A 层和 B 层土壤毛管孔隙度均呈波动性下降,A 层土壤毛管孔隙度由对照样地的 49.22% 下降到 5% 间伐样地的 43.25%、10% 间伐样地的 42.56%、15% 间伐样地的 42.44%、20% 间伐样地的 41.39%;B 层土壤毛管孔隙度分别由 45.29% 下降到 40.86%、38.31%、36.22%、35.61%。随间伐强度的增大,(A+B)层土壤毛管孔隙度显著下降($p < 0.05$),表明随着间伐强度的增大,土壤持水能力有可能随之降低。

间伐 2 a 后,4 种间伐强度下样地 A 层土壤非毛管孔隙度分别为 24.63%、18.82%、15.00%、15.12%,B 层土壤毛管孔隙度分别为 15.52%、10.94%、11.04%、10.71%。5% 间伐样地 A、B 层土壤非毛管孔隙度大于对照林。随间伐强度的增加,各间伐样地(A+B)层土壤非毛管孔隙度大小排序为 5% 间伐 > 10% 间伐 > 15% 间伐 > 20% 间伐,差异显著($p < 0.05$),5% 间伐样地土壤非毛管孔隙度最大,说明该间伐强度下,降水可迅速入渗到土壤,从而有利于降低地表径流和减小土壤侵蚀量。入渗到土壤中的水分,在形成壤中流后,缓缓流出,延长了径流历时,削减了洪峰流量,有利于水资源开发利用。因

此, 从有利于调节洪水径流的角度考虑, 对锐齿栎林的抚育间伐, 间伐强度为 5% 较佳。

表 2 不同间伐强度样地土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties under different thinning intensities

样地	土层 /cm	容重 / $(g \cdot cm^{-3})$	孔隙度/%		
			毛管孔隙	非毛管孔隙	总孔隙
对照	A 层	0.65±0.05	49.22±7.29	20.58±9.56	69.80±2.63
	B 层	0.92±0.11	45.29±5.55	14.57±6.04	59.86±1.25
	(A+B)层	0.78 a	47.26 a	17.57a	64.83a
5%间伐	A 层	0.74±0.05	43.25±5.57	24.63±5.24	67.88±2.95
	B 层	1.02±0.10	40.86±4.64	15.52±3.30	56.38±3.49
	(A+B)层	0.88 b	42.06b	20.07b	62.13b
10%间伐	A 层	0.83±0.06	42.56±7.92	18.82±6.09	61.38±3.49
	B 层	1.08±0.12	38.31±4.68	10.94±2.57	56.24±4.45
	(A+B)层	0.96c	40.43c	14.88c	58.86. c
15%间伐	A 层	0.94±0.10	42.44±6.47	15.00±2.03	57.44±4.83
	B 层	1.18±0.06	36.22±3.69	11.04±2.97	47.26±3.67
	(A+B)层	1.06 d	39.33d	13.02d	52.35. d
20%间伐	A 层	0.96±0.04	41.39±2.61	15.12±1.74	56.51±2.07
	B 层	1.24±0.04	35.61±3.69	10.71±2.46	46.32±3.56
	(A+B)层	1.10 e	38.50e	12.92e	51.42e

注: 数据为平均值±标准误差, 同一列不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。表 3、图 1 同。

总孔隙度的变化趋势与容重相反, A 层土壤总孔隙度由对照样地的 69.80% 下降到 5% 间伐样地的 67.88%、10% 间伐样地的 66.37%、15% 间伐样地的 57.44%、20% 间伐样地的 56.51%; B 层土壤总孔隙度分别由 59.86% 下降到 56.38%、56.24%、47.26%、46.32%, 再次说明间伐扰动对土壤密实程度产生了影响, 而且这种影响有随间伐强度增大而增大的趋势。4 种间伐强度下 (A+B) 层土壤总孔隙度分别为 62.13%、61.31%、52.35%、51.42%, 呈显著性下降 ($p < 0.05$)。

2.1.2 对土壤持水性能的影响 林地土壤层是水分贮蓄的主要场所, 其持水能力是反映林地水源涵养能力的重要指标之一。间伐 2 a 后, 4 种间伐样地 A 层土壤自然持水量为分别 449.61、450.56、428.57、388.89 t/hm², B 层土壤分别为 320.58、316.61、298.70 t/hm² 和 282.05 t/hm², 显著低于对照样地 A 层的 530.51 t/hm² 和 B 层的 399.36 t/hm² ($p < 0.05$) (表 3)。统计分析的结果表明, 随间伐强度的增大, (A+B) 层土壤自然持水量显著下降 ($p < 0.05$)。

表 3 不同间伐强度下土壤持水性能

Table 3 Soil water-holding capacity under different thinning intensities

(t · hm⁻²)

样地	土层	自然持水量	最小持水量	毛管持水量	最大持水量
对照	A 层	530.51±12.32	757.11±38.81	598.49±38.11	1079.9±98.81
	B 层	399.36±19.34	513.29±77.95	414.03±46.24	685.89±74.56
	(A+B)层	464.94a	635.20a	506.26a	882.91a
5%间伐	A 层	449.61±22.25	584.34±67.52	478.56±33.53	926.26±34.63
	B 层	320.58±18.01	405.34±12.96	324.57±19.52	560.68±39.70
	(A+B)层	385.10b	494.84b	401.57b	743.47b
10%间伐	A 层	450.56±27.66	572.65±15.15	459.43±35.73	801.01±73.79
	B 层	316.61±2470.	431.26±36.29	371.96±34.31	534.97±29.47
	(A+B)层	383.59c	501.95c	415.69c	667.99c
15%间伐	A 层	428.57±21.78	450.08±14.74	415.34±16.98	624.90±36.15
	B 层	298.70±15.48	307.68±23.19	267.29±21.08	428.08±26.65
	(A+B)层	363.64d	378.88d	341.32d	526.49d
20%间伐	A 层	388.89±28.80	418.65±10.08	338.98±9.40	628.35±21.88
	B 层	282.05±18.88	301.94±28.25	249.61±30.53	389.93±38.54
	(A+B)层	352.37e	371.45e	336.84. e	519.55e

间伐 2 a 后, 随间伐强度的增大, 4 种间伐强度下 A 层土壤毛管持水量逐渐下降, B 层呈波动性下降。4 种间伐样地 A 层土壤毛管持水量为分别 584.34、572.65、450.56 t/hm² 和 418.65 t/hm², B

层土壤分别为 405.34、431.26、307.68 t/hm² 和 301.94 t/hm², 显著低于对照样地 A 层的 757.11 t/hm² 和 B 层的 513.29 t/hm² ($p < 0.05$)。统计分析结果表明, 随间伐强度的增大, (A+B) 层土壤毛管

持水量呈波动性下降,各间伐样地间差异显著($p < 0.05$),表明间伐后林地土壤的毛管持水量下降。

间伐 2 a 后,最小持水量也出现明显变化,A 层土壤最小持水量由对照样地的 598.49 t/hm^2 下降至 5% 间伐样地的 478.56 t/hm^2 、10% 间伐样地的 459.43 t/hm^2 、15% 间伐样地的 415.34 t/hm^2 、20% 间伐样地的 338.98 t/hm^2 ; B 层土壤由 414.03 t/hm^2 下降至 324.57 、 371.96 、 267.29 t/hm^2 和 249.61 t/hm^2 ,方差分析表明各间伐强度 A、B 层土壤最小持水量差异均显著($p < 0.05$)。随间伐强度的增大,(A+B)层土壤最小持水量呈波动性下降。

随间伐强度的增加,锐齿栎林样地 A 层、B 层土壤最大持水量逐渐降低,A 层土壤最大持水量分别由对照样地的 1079.9 t/hm^2 下降 5% 间伐样地的 926.26 t/hm^2 、10% 间伐样地的 801.01 t/hm^2 、15% 间伐样地的 624.90 t/hm^2 、20% 间伐样地的 628.35 t/hm^2 ; B 层土壤由 685.89 t/hm^2 下降至 560.68 、 534.97 、 428.08 t/hm^2 和 389.93 t/hm^2 ,方差分析表明各间伐强度 A、B 层土壤最大持水量差异均显著($p < 0.05$)。统计分析结果表明,随间伐强度的增大,(A+B)层土壤最大持水量显著下降($p < 0.05$)。与对照样地比较,间伐 2 a 后,各间伐样地土壤自然持水量、毛管持水量、最小持水量及土壤最大持水量的下降表明间伐活动降低了样地土壤贮藏水分的潜力,且间伐活动对土壤的持水性能的影响持续时间较长。

2.1.3 对土壤渗透性能的影响 土壤渗透性是土壤理水调洪功能极为重要的特征参数之一,能够将地表径流转化为壤中流、地下径流,对土壤水土保持及水源涵养功能影响极大^[14]。

间伐 2 a 后,4 种间伐强度下样地 A 层土壤渗透系数分别为 5.06 、 3.46 、 2.97 mm/min 和 2.83 mm/min ,B 层土壤分别为 2.22 、 1.70 、 1.72 mm/min 和 1.69 mm/min ,5% 间伐样地 A、B 层土壤渗透系数显著高于对照样地(A 层)($p < 0.05$),这主要与 5% 间伐样地非毛管孔隙高于对照样地有关,其他间伐样地土壤渗透系数均显著低于对照样地($p < 0.05$),间伐各样地 A 层土壤渗透系数差异显著($p < 0.05$),10% 间伐与 20% 间伐样地 B 层土壤差异不显著($p > 0.05$)(图 1)。随着间伐强度的增大,(A+B)层土壤渗透系数显著下降($p < 0.05$)。间伐 2 a 后,除 5% 间伐样地外,其他样地土壤渗透系数均小于对照样地表明间伐活动降低样地土壤的渗透性能,且对土壤渗透性能影响持续时间较长。间伐强度为 5% 时,锐齿栎林土壤的渗透性能最好,说明该间伐强度下降水很快通过非毛管孔隙(重力

作用)转入地下水,产生的地表径流量和土壤侵蚀量最小,土壤理水调洪功能最强。

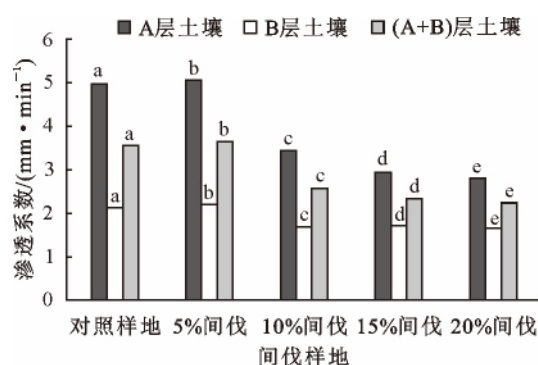


图 1 不同间伐强度下土壤渗透系数的变化

Fig. 1 Change of soil permeability under different thinning intensities

2.2 不同间伐强度土壤水文功能及影响因素综合分析

2.2.1 不同间伐强度土壤水文功能综合分析 林地土壤是森林水文功能发挥的主体,一方面,林地土壤通过渗透作用减少地表径流,缓解雨季降水的汇集;另一方面通过强大的贮水功能在时间上阻滞和延长流域产流分配,从而实现理水调洪的水源涵养功能^[15]。土壤的水文效应评价指标之间的相关性很强^[16],为了避免重复利用一些潜在信息分析,从本质上揭示秦岭南坡中山地带锐齿栎林土壤水文效应的主要影响因子,综合评定不同间伐强度土壤的水文效应,本研究选择了主成分分析的方法。主成分分析是将原来众多具有相关性的指标化为少数几个相互独立的综合指标的一种统计方法。林地土壤层的水文效应是其蓄水和渗透性能的共同体现。林地土壤持水量是反映森林水源涵养能力的重要指标之一,而林地蓄洪作用主要反映在非毛管孔隙水的贮存能力上。因此选取土壤最大持水量(X_1),最小持水量(X_2),非毛管持水量(X_3),10℃的渗透系数(X_4)为评价指标,对其进行主成分分析。

结果表明,土壤水文效应第 1 主成分方差累积贡献率为 91.420%,特征值 3.657(> 1)(表 4),信息损失量较少,且除最小持水量外的指标在第 1 主成分上的负荷值均在 0.5 以上,表明了与土壤水文效应相关的土壤水文物理性质的第 1 主成分表达了 50% 以上的信息。其主成分综合模型为: $P = 0.52XZ_1 + 0.48XZ_2 + 0.51XZ_3 + 0.50XZ_4$ (XZ 为各指标的标准化数据)。从综合得分来看,林地土壤的水文效应优劣好坏表现为对照样地 $> 5\%$ 间伐 $> 10\%$ 间伐 $> 15\%$ 间伐 $> 20\%$ 间伐,对照样地锐齿栎土壤的综合水文效应最优,综合主成分 $P = 2.421$;土壤的综合水文效应随间伐强度的增大呈减小趋势(表

5)。因此,在秦岭南坡林分营造和配置方面,不可盲目采伐,应根据林分密度大小与适宜程度进行合理间伐更新,以便更好地发挥森林水源涵养功能。

表 4 土壤综合水文功能主成分分析

Table 4 Principal component analysis the comprehensive hydrological effect of soil

项目	X1	X2	X3	X4	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
P1	0.52	0.48	0.52	0.50	3.657	91.420	91.420

表 5 不同间伐强度土壤综合水文功能评价

Table 5 Evaluation of the comprehensive hydrological effect of soil under different thinning intensities

排名	1	2	3	4	5
样地	对照样地	5%间伐	10%间伐	15%间伐	20%间伐
综合主成分 P	2.421	1.426	-0.166	-1.634	-2.047

2.2.2 不同间伐强度下土壤水文功能的主要影响因素 研究表明,随着间伐强度的增大,秦岭南坡锐齿栎林土壤水文功能呈下降趋势。由相关性分析结果(表 6)可知,土壤自然持水量的大小与毛管孔隙显著的正相关($p < 0.05$),与土壤容重有显著的负相关($p < 0.05$);毛管持水量、最小持水量、最大持水量与毛管孔隙、总孔隙均存在显著正相关($p < 0.05$),土壤自然持水量、毛管持水量、最小持水量与

土壤容重有显著的负相关($p < 0.05$),最大持水量与土壤容重有极显著的负相关($p < 0.01$);渗透性能大小与非毛管孔隙有极显著的正相关($p < 0.01$),与土壤容重存在显著的负相关($p < 0.05$),间伐活动破坏了原有植被和土壤的结构,导致土壤容重增大,孔隙度下降,毛管孔隙与非毛管孔隙的下降是样地土壤持水性能和渗透性能降低的直接原因。

表 6 间伐各样地土壤水文功能主要因素的相关分析

Table 6 Correlations between the comprehensive hydrological effect of soil and environment factors

因素	容重	毛管孔隙	非毛管孔隙	总孔隙	自然持水量	毛管持水量	最小持水量	最大持水量	渗透系数
容重	1	-0.94*	-0.83	-0.95*	-0.91*	-0.96*	-0.94*	-0.99**	-0.92*
毛管孔隙	-0.94*	1	0.65	0.82	0.98*	0.94*	0.95*	0.95*	0.82
非毛管孔隙	-0.83	0.65	1	0.81	0.23	0.19	0.15	0.80	0.96**
总孔隙	-0.95*	0.82	0.81	1	0.80	0.94*	0.91*	0.95*	0.84
自然持水量	-0.91*	0.98*	0.23	0.80	1	0.95*	0.96**	0.92*	0.73
毛管持水量	-0.96*	0.94*	0.19	0.94*	0.95*	1	0.99**	0.97**	0.79
最小持水量	-0.94*	0.95*	0.15	0.91*	0.96**	0.99**	1	0.96**	0.75
最大持水量	-0.99**	0.95*	0.80	0.95*	0.92*	0.97**	0.96**	1	0.90
渗透系数	-0.92*	0.82	0.96**	0.84	0.73	0.79	0.75	0.90*	1

注:容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度、自然含水量、毛管持水量、最小持水量和最大持水量为(A+B)层的平均值; ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ 。

3 结论

对秦岭南坡中山地带就间伐强度对锐齿栎林土壤水文特性影响研究得出,间伐 2 a 后,各间伐样地土壤容重显著大于对照样地($p < 0.05$),总孔隙、毛管孔隙则显著小于对照样地($p < 0.05$),5%间伐样地土壤非毛管孔隙大于对照样地,其他间伐样地均小于对照样地。随着间伐强度的增加,土壤容重显著增大($p < 0.05$),毛管孔隙、非毛管孔隙、总孔隙度显著下降($p < 0.05$),且间伐活动对 A 层土壤容重的影响大于 B 层。土壤容重和孔隙度的变化导致持水量的下降,其中各间伐样地土壤的自然含水量、毛管持水量、最小持水量和最大持水量均显著低于对照样地($p < 0.05$),随着间伐强度的增大,土壤的自然含水量、毛管持水量、最小持水量和最大持水

量显著下降($p < 0.05$)。5%间伐样地土壤的渗透性能优于对照样地,其他间伐样地均低于对照样地,随间伐强度的增大,各间伐样地渗透性能持续下降。综合分析各不同间伐强度林地土壤最大持水量、最小持水量、非毛管持水量和 10℃ 时的渗透系数,得出锐齿栎林对照样地土壤的水文功能最优,说明秦岭南坡林区锐齿栎林土壤对间伐活动引起的扰动较为敏感,且间伐对土壤水文功能的影响可能长期延续。5%间伐样地土壤的综合水文效应优于其他间伐样地。因此,从林地土壤更好的发挥森林水文功能方面考虑,在秦岭南坡锐齿栎林分营造和配置方面,选择未间伐样地最佳。

参考文献:

[1] 张胜利,李靖,韩创举,等. 南水北调中线工程水源林生态系

- 统对水质的影响[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 559-565.
ZHANG S L, LI J, HAN C J, *et al.* Effect of the forest ecosystem on water quality in the water supply catchment for the middle line of South-to 2-North Water Transfer Project[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 559-565 (in Chinese)
- [2] LAHDE E, LAIHO O, NORORPI Y, *et al.* Development of Norway spruce dominated stands after single-tree selection and low thinning[J]. Can. J. For. Res., 2002, 32: 1577-1584.
- [3] CROW T R, BUCKLEY D S, NAUERTZ E A, *et al.* Effects of management on the composition and structure of Northern hardwood forests in upper Michigan[J]. For. Sci., 2002, 48(1): 129-145.
- [4] KARLSSON A, ALBREKTSON A, ELFVING B, *et al.* Development of *Pinus sylvestris* main stems Following three different precommercial thinning methods in a mixed stand[J]. Scand J. For. Res., 2002, 17: 256-262.
- [5] TAMMINEN P, SAARSALMI A, SMOLANDER A, *et al.* Effect of logging residue harvest in thinnings on amounts of soil carbon and nutrients in Scots pine and Norway spruce stands[J]. Forest Ecology and Management, 2012, 263: 31-38.
- [6] BALDWIN V C, PETERSON K D. The effect of spacing and thinning on stand and tree characteristic of 38 year old lob-lolly pine[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 137(3): 91-102.
- [7] PARROTTA J A, FRANCIS J K, KNOWLES O H. Harvesting intensity affects forest structure and composition in all upland[J]. Amazonian Forest, For. Ecol. Manage, 2002, 169: 243-255.
- [8] 王德连, 雷瑞德, 王谊. 秦岭火地塘林区地表水水质分析和综合评价[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(1): 25-28.
WANG D L, LEI R D, WANG Y. Water quality analysis and comprehensive evaluation of the surface water in Huoditang Forest Region of Qinling[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(1): 25-28 (in Chinese)
- [9] 党坤良. 秦岭火地塘林区不同林地土壤水分动态特征的研究[J]. 西北林学院学报, 1995, 10(1): 1-8.
DANG K L. Studies on dynamic characteristics of soil moisture in different forests at Huoditong Forest Region in the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 1995, 10(1): 1-8 (in Chinese)
- [10] 雷瑞德. 秦岭火地塘林区华山松林水源涵养功能的研究[J]. 西北林学院学报, 1984, 1(1): 19-34.
- [11] 叶炳, 丁桂芳. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中华人民共和国国家出版社, 1988.
- [12] 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): 196-202.
CHEN B, YANG X B, ZHAO X M. 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): 196-202. (in Chinese)
- [13] 孙艳红, 张洪江. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109.
SUN Y H, ZHANG H J. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 106-109. (in Chinese)
- [14] 王棣, 吕皎. 油松混水土保持及水源涵养功能研究[J]. 水土保持报, 2001, 15(4): 44-46.
WANG D, LV J. Function of water and soil conservation of mixed forest of *Pinus tabulae form* is carr[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(4): 44-46. (in Chinese)
- [15] 刘道平. 黄浦江上游水源林水文生态功能的研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [16] 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5780-5788.
XIONG Y Q, WU P F, ZHANG H Z, *et al.* Dynamics of soil water conservation during the degradation process of the Zoigê Alpine Wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5780-5788. (in Chinese)