

# 不同间伐强度下桥山麻栎林土壤渗透特性

陈永华<sup>1</sup>, 叶权平<sup>2</sup>, 张文辉<sup>2</sup>, 刘小军<sup>3</sup>

(1. 陕西省延安市黄龙山林业局, 陕西 黄龙 715700; 2. 西北农林科技大学

陕西省林业综合实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西省延安桥山林业局, 陕西 黄陵 727300)

**摘要:**为了探讨不同抚育间伐强度下麻栎(*Quercus acutissima*)林土壤水分渗透规律及影响因素,以桥山林区麻栎天然次生林地土壤为研究对象,对不同间伐强度(对照,10%,20%,30%)近自然经营抚育间伐5年后麻栎林的土壤入渗、土壤基本物理性质和土壤根系进行了研究。结果表明:在0—10 cm土层中土壤渗透性能表现为间伐30%>间伐20%>间伐10%>对照;林地土壤总孔隙度、非毛管孔隙度随着间伐强度增强而增大,间伐达到20%以上显著高于对照,土壤容重则随间伐降低;在10—20 cm土层中,间伐对土壤入渗及土壤基本物理性质并无显著影响;土壤根系结构指标随间伐强度增强而升高;通过相关性分析知,土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、根长密度、根表面积密度是影响该地区土壤渗透性的关键因素;Philip模型能准确描述该研究区域的土壤水分入渗过程。间伐对土壤表层(0—10 cm)的渗透性具有显著的改善作用,对较深层(10—20 cm)土壤的渗透性并无显著影响。

**关键词:**土壤渗透性;麻栎林;间伐强度;根长密度

**中图分类号:**S714.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)01-0113-05

## Soil Permeability Characteristics of *Quercus acutissima* Forest under Different Thinning Intensities in Qiaoshan Mountains

CHEN Yonghua<sup>1</sup>, YE Quanping<sup>2</sup>, ZHANG Wenhui<sup>2</sup>, LIU Xiaojun<sup>3</sup>

(1. Huanglongshan Forestry Bureau of Yan'an, Shaanxi Province, Huanglong, Shaanxi 715700,

China; 2. Key Comprehensive Laboratory of Forestry in Shaanxi Province, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. Qiaoshan Forestry Bureau of Yan'an, Shaanxi Province, Huangling, Shaanxi 727300, China)

**Abstract:** In order to investigate the law and influencing factors of the soil permeability in *Quercus acutissima* forest under different tending thinning intensities, we took the *Q. acutissima* natural secondary forests in Qiaoshan forests as the study site. The analyses were made on soil permeability, soil basic physical properties and plant roots of the near natural management tending *Q. acutissima* forest after 5 years of thinning under different tending thinning intensities (CK, 10%, 20%, 30%). The results showed that the soil permeability ability in 0—10 cm soil layer decreased in the order: thinning rate (20%)>thinning rate (10%)>CK>thinning rate (30%); the total soil porosity and non-capillary porosity of woodland increased with the increase of thinning intensity and the they was significantly higher under thinning rate greater than 20% than those of the control, while the soil bulk density decreases with the thinning intensity. Thinning had no significant effect on soil infiltration and soil physical properties in 10—20 cm soil layer. The plant root structure index increased with the increase of thinning intensity. According to the correlation analysis, the soil bulk density, total porosity, non-capillary porosity, root length density and root surface area density are the key factors affecting soil permeability in this area. The Philip model can accurately describe the process of soil water infiltration in the study area. Thinning had a significant improvement on the permeability of soil surface (0—10 cm), but had no significant effect on the permeability of deeper soil (10—20 cm).

**Keywords:** soil permeability characteristics; *Quercus acutissima* forest; thinning intensity; root length density

土壤入渗是指降水或其他形式的地表水进入土壤的过程,土壤渗透性能影响土壤对水分的传输及再分配,与植物对土壤水分的吸收利用、土壤侵蚀、土壤水肥迁移、地表产流产沙等问题紧密联系,土壤入渗性能越好,地表径流量越小,发生土壤侵蚀的危害性越小,林地水分利用率高,利于林地植物生长<sup>[1-2]</sup>。因此,土壤的渗透能力是影响土壤侵蚀的重要因素之一,是土壤水文效应评价的重要指标<sup>[3-4]</sup>。研究表明,土壤基本物理性质、在土壤中穿插的土壤根系特征与土壤渗透性能密切相关<sup>[5-6]</sup>。适当抚育间伐促进林地枯落物分解,改善林下植物生存环境,从而改变林下土壤容重、土壤孔隙度等物理特征及土壤根系状况,进而影响土壤的渗透性能<sup>[7]</sup>。

目前,国内外对土壤渗透性能的研究主要针对不同植被类型、不同土地利用方式、土壤理化性质、凋落物层等方面<sup>[8-11]</sup>。陈家林等<sup>[12]</sup>研究发现,从裸地、草地、灌草地、灌丛到乔灌林地,土壤渗透性能不断增加。Bormann等<sup>[13]</sup>认为土壤水分状况和供水条件一致的情况下,土壤水力特性决定土壤的入渗能力。麻栎(*Quercus acutissima*)为壳斗科栎属落叶乔木,属桥山林区主要地带性成林树种之一,其对当地的水土保持、生物多样性保护与生态区域安全发挥着重要作用<sup>[14]</sup>。抚育间伐作为森林近自然经营中最受推崇的经营措施<sup>[15]</sup>,苏芳莉等<sup>[16]</sup>对不同间伐强度下天然次生林林地土壤性质进行调查研究发现,杂木林及油松林土壤物理性质均优于未间伐林分,柞树林土壤物理性质表现出相反的规律,但其对麻栎林土壤渗透性能影响的研究尚未见报道。本研究通过对黄土高原南部桥山林区4种不同间伐强度下麻栎林0—10 cm(表层)和10—20 cm(下层)土壤渗透性能进行调查,探讨了不同间伐强度下土壤渗透性能的变化,及其与土壤基本物理性质、土壤植物根系特征的关系,阐明抚育间伐强度对麻栎林土壤渗透性能的影响,以期充分发挥其水土保持、生态环境保护功能,减少土壤侵蚀提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域选择黄土高原南部的陕西省延安市黄陵县的桥山林区(108°31′—109°11′E,35°30′—35°50′N),海拔1 100~1 750 m,属暖温带季风气候,年平均气温9.4℃,最热月(7月)平均气温21℃,极端最高气温38℃,最冷月(1月)平均气温-5℃,极端最低气温-23℃,无霜期190~225 d,年均降水量609.5 mm,多集中在7月、8月、9月,年蒸发量为1 202 mm,相对

湿度为60%~70%,年日照时间为2 528 h,主要土壤类型为森林褐土和灰褐土,是陕西省黄土高原上森林保存较好的地方。该区为天然次生林,主要乔木树种有麻栎(*Quercus acutissima*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、茶条槭(*Acer ginnala*)、白桦(*Betula platyphylla*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等;主要灌木树种有陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)等;主要草本植物有披针叶苔草(*Carex lanceolata*)、苦参(*Sophora foetida*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、野棉花(*Anemone hupehensis*)等<sup>[14]</sup>。

### 1.2 样地设置与土壤采集及分析

在延安桥山林区设置间伐样地,选定的对象是林相发育良好的立地条件相似的麻栎次生林,该地区大部分麻栎林乔木层郁闭度高达0.8~0.9,林内被压木有自然枯死现象。2011年春季,于该地区选择林相、林分密度基本一致的林分,各设置对照和10%,20%,30%间伐强度4种类型20 m×30 m固定样地1块,间伐遵循被伐木为劣质木、病虫木和过密的林木等技术要求。此后,林地处于自然恢复和保护状态,未经受过较大的外界干扰。2016年7月(间伐5 a后),对每一样地沿对角线取3个土壤剖面,于0—10,10—20 cm土层处用环刀取样,环刀规格20 cm<sup>2</sup>×5 cm,每个土层重复3次。用于土壤容重、孔隙度及初始含水量等物理性质的测定。采用大环刀(直径10 cm×高10 cm)分层挖取含根系的土壤样柱,土样中的根系于网筛内冲洗后,由根系分析系统WinRHIZO完成土壤根系特征分析的测定,再将根系于烘箱48 h(90℃)烘干后称重。

### 1.3 土壤渗透性计算

土壤渗透特性的测定采用双环法<sup>[17]</sup>,在不同间伐强度类型样地内,剪除待测地表植被及枯落物,将双环测渗仪用橡胶锤缓慢均匀打入地下10 cm深,尽量保持土壤结构不受破坏,内外环处于同心状态,利用量筒为圆环供水,当内环和外环水层厚度达到5 cm时开始用秒表计时,并分别在0,0.5,1,1.5,2,3,4,5,6,8,10,15,20,25,30 min及以后每10 min读取量筒标尺刻度,直到刻度变化平稳为止。初始渗透速率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间;稳态渗透速率为达到稳态时单位时间内的渗透量;平均渗透速率=达到稳态时的渗透总量/达到稳态时的时间;因各样地土壤的渗透速率在0—10 min急剧下

降,1 h 内均达到稳定,为便于比较,初始渗透速率的入渗时间统一取前 2 min,渗透总量统一取前 60 min 内的渗透量。

1.4 土壤水分入渗模型

建立土壤入渗模型是研究土壤入渗的重要方法,国内外有多种土壤入渗经验模型,用来模拟土壤入渗随时间变化特征,结合研究实际,本研究选取以下 3 种模型对不同间伐强度下麻栎林土壤入渗特征进行模拟。

Kostiakov 模型: $f(t)=at^{-b}$   
式中: $f(t)$ 为入渗速率; $t$ 为入渗时间; $a$ 为拟合参数; $b$ 为经验系数一般为 0.3~0.8。

Horton 模型: $f(t)=f_o+(f_o-f_c)e^{-kt}$   
式中: $f(t)$ 为入渗速率; $t$ 为入渗时间; $f_c$ 为稳定入渗率; $f_o$ 为初始入渗率; $k$ 为土壤物理特征指数。

Philip 模型: $f(t)=\frac{1}{2}st^{-1/2}+A$   
式中: $f(t)$ 为入渗速率; $t$ 为入渗时间; $s$ 为土壤吸收系数; $A$ 为土壤稳定入渗率。

1.5 数据处理及分析

利用 Exccel 2010 和 SPSS 23.0 软件对实测数

据进行统计分析。采用单因素方差分析进行方差分析,以 Duncan 法进行多重比较( $\alpha=0.05$ ),采用非线性回归对土壤渗透数学模型进行拟合。

2 结果与分析

2.1 不同间伐强度下土壤入渗特征

土壤入渗能力不但决定着水分进入土壤的数量,还决定着土壤地表径流的数量,土壤良好的入渗能力可降低侵蚀作用<sup>[18]</sup>。以土壤的初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率以及渗透总量 4 特征指标对不同间伐强度下土壤的入渗特性进行综合评价,可较全面的反映其土壤的入渗能力。由表 1 可知,在 0—10 cm 土层中土壤的初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量随着间伐强度增强而增大,其中间伐 30% 的土壤初渗速率、稳渗速率都显著高于其他 3 个类型。CK 和间伐 10% 的土壤平均渗透速率、渗透总量间无显著差异,当间伐强度达到 20% 以上则有显著增加。在 10—20 cm 的土层中 4 个类型土壤的渗透性能差异并不显著,4 个土壤渗透特征指标之间也并无显著差异,间伐强度对此土层的土壤渗透能力无显著影响。

表 1 不同间伐强度的土壤水分入渗特性(平均值±标准误差)

间伐 强度/%	土层/ cm	初渗速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	稳渗速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	平均渗透速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	渗透总量/ (ml·cm <sup>-2</sup> )
CK	0—10	7.86±0.37a	1.12±0.09a	3.15±0.24a	88.51±2.93a
	10—20	3.47±0.22a	0.87±0.07a	1.68±0.18a	68.36±1.54a
10	0—10	8.04±0.43a	1.15±0.11a	3.24±0.21a	92.42±3.51a
	10—20	3.52±0.18a	0.84±0.04a	1.69±0.14a	72.41±2.03a
20	0—10	8.38±0.35a	1.21±0.13a	3.82±0.38b	102.21±4.42b
	10—20	3.51±0.11a	0.89±0.08a	1.63±0.11a	73.34±1.76a
30	0—10	9.42±0.58b	1.34±0.12b	4.72±0.43c	128.13±4.22c
	10—20	3.48±0.15a	0.85±0.04a	1.65±0.16a	75.62±1.99a

注:同列不同小写字母表示具有显著差异( $p<0.05$ )。

2.2 土壤入渗影响因子分析

由表 2 可知,在 0—10 cm 的表层土中,不同间伐强度下土壤初始含水量在 3.18%~3.67%,其中间伐强度为 30% 的土壤初始含水量最低,对照样地土壤初始含水量最高。土壤容重和土壤孔隙度反映了土壤的松紧程度,不同间伐强度下土壤容重为 30% < 20% < 10% < CK,且 30% 间伐强度下其土壤容重显著低于其他 3 种间伐类型。在土壤的毛管孔隙度和非毛管孔隙度中均以 30% 的间伐强度下最大分别为 47.82% 和 8.75%,且与其他类型之间存在显著差异;而毛管孔隙度最小的为 20% 间伐强度,非毛管孔隙度最小的为 30% 间伐强度。在 10—20 cm 土层中不同间伐强度下土壤的各项基本物理性质与对照之间并不存在显著差异。

由表 3 可知,根系指标中间伐后的根长密度大于

对照样的,其中间伐强度为 30% 的根长密度最大为 0.58 cm/cm<sup>3</sup>;对照 CK、间伐 10% 及 20% 的根表面积密度之间均无显著差异,但间伐 30% 的根表面积密度显著大于其他 3 种类型;4 种不同间伐强度下的土壤根重密度之间并无显著差异。

土壤的初始含水量、土壤容重和土壤孔隙度等基本物理性质与土壤的渗透特性密切相关,在很大程度上决定着土壤的渗透能力。对土壤的入渗特性指标与土壤的基本物理性质及根系结构特征进行相关性分析,结果见表 4。土壤 4 个入渗指标与土壤的初始含水量和土壤容重均呈现负相关关系,与土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均呈现正相关关系。在负相关中土壤容重与 4 个土壤入渗指标均为显著相关,初始含水量只与初渗速率为显著相关,相关系数为-0.891,与其他 3 个指标为不显著相关;在正相关中土壤总孔隙度与 4 个

入渗指标均呈显著相关,毛管孔隙为不显著相关,非毛管孔隙度与土壤初渗速率和渗透总量呈极显著相关,相关系数为 0.944,与稳渗速率和平均渗透速率呈显著相关。土壤入渗指标与土壤根系结构都呈正相关关系,但与根重密度之间并无显著相关性;根长密度与初渗速率之间呈极显著正相关,相关系数为 0.931,与稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量显著相关;根表面积密度与 4 个人渗指标均为显著相关。

表 2 不同间伐强度的土壤基本物理性质

间伐强度/%	土层/cm	初始含水量/%	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
CK	0—10	3.67±0.18a	1.28±0.02a	52.22±0.67a	45.95±0.81a	5.24±0.98a
	10—20	3.94±0.17a	1.35±0.07a	48.45±0.52a	42.86±0.39a	3.47±0.74a
10	0—10	3.64±0.21a	1.24±0.04ab	52.64±0.72ab	45.80±0.95a	5.79±1.43ab
	10—20	3.92±0.19a	1.33±0.03a	48.68±0.68a	42.79±0.85a	3.52±0.92a
20	0—10	3.58±0.11a	1.17±0.04b	54.17±0.54b	45.45±1.04a	6.45±1.27b
	10—20	3.88±0.23a	1.31±0.07a	48.74±0.74a	42.68±0.52a	3.53±0.68a
30	0—10	3.18±0.14b	1.06±0.05c	58.32±1.02c	47.82±1.13b	8.75±1.08c
	10—20	3.85±0.16a	1.31±0.04a	48.77±0.66a	42.71±0.46a	3.57±0.35a

注:同列不同小写字母表示具有显著差异( $p<0.05$ )。

表 3 不同间伐强度的土壤根系结构指标  
(平均值±标准误差)

间伐强度/%	根长密度/(cm·cm <sup>-3</sup> )	根表面积密度/(cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	根重密度/(mg·cm <sup>-3</sup> )
CK	0.34±0.26a	0.41±0.09a	4.26±0.94a
10%	0.41±0.33ab	0.44±0.05a	4.31±0.82a
20%	0.46±0.28b	0.43±0.04a	4.35±0.47a
30%	0.58±0.45c	0.59±0.11b	4.43±0.53a

注:同列不同小写字母表示具有显著差异( $p<0.05$ )。

2.3 土壤入渗模型

土壤入渗过程模拟是研究土壤水分入渗这一水文过程的重要途径,对不同间伐强度下麻栎林土壤水

分渗透数据按照选定的入渗模型进行过程模拟,结果见表 4。非线性回归通过决定系数  $R^2$  反映模型模拟的准确性,由表 5 可以看出 Kostikov 模型拟合的  $R^2$  为 0.66~0.91;Horton 模型拟合的  $R^2$  为 0.74~0.94;Philip 模型拟合的  $R^2$  为 0.84~0.98。Philip 模型拟合结果与实测数据的相关性最高,说明 Philip 模型更适合模拟该区域的土壤水分入渗过程。从 Philip 模型的拟合结果来看, $s$  值为间伐强度 30%>20%>10%>CK, $s$  值的大小反映土壤的入渗能力, $s$  值越大,表明土壤入渗能力越强。式中不同间伐强度的  $s$  值所反映情况与实测的土壤入渗指标大小规律表现一致。

表 4 土壤入渗特征与土壤基本物理性质及根系结构指标相关性分析

土壤入渗指标	初始含水量	土壤容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	根长密度	根表面积密度	根重密度
初渗速率	-0.891*	-0.821*	0.814*	0.723	0.944**	0.931**	0.842*	0.605
稳渗速率	-0.542	-0.835*	0.837*	0.625	0.868*	0.851*	0.836*	0.586
平均渗透速率	-0.782	-0.829*	0.822*	0.647	0.883*	0.844*	0.821*	0.721
渗透总量	-0.664	-0.853*	0.855*	0.695	0.937**	0.832*	0.805*	0.633

注:\*表示在 0.05 水平上显著相关;\*\*表示在 0.01 水平上极显著相关。

表 5 不同间伐强度下土壤水分入渗模型

间伐强度/%	Kostiakov 模型			Horton 模型		Philip 模型		
	$a$	$b$	$R^2$	$k$	$R^2$	$s$	$A$	$R^2$
CK	9.77	0.49	0.73**	0.15	0.77**	15.23	1.12	0.84**
10	9.43	0.53	0.66*	0.14	0.94**	16.04	1.15	0.98**
20	10.04	0.42	0.80**	0.13	0.74**	16.60	1.21	0.87**
30	10.98	0.36	0.91**	0.10	0.82**	17.71	1.34	0.92**

注:\*表示  $p<0.05$ ; \*\*表示  $p<0.01$ 。

3 结论

(1) 土壤渗透能力主要取决于土壤容重和孔隙度,土壤的入渗特征与土壤容重呈负相关,与总孔隙度呈正相关<sup>[19-20]</sup>。王利东等<sup>[21]</sup>发现土壤容重随着间

伐强度的加大持续下降,同时土壤总孔隙度等指标则随间伐强度的增大而升高。间伐使林窗增大和增多可以改善林内环境条件,增强林内光照提高土壤温度,加快植物残枝及枯落物形成土壤腐殖质,有效改善了表层土壤结构,促进孔隙度的形成,降低土壤容

重,有利于水分下渗,但间伐强并不能明显影响较深层土壤的结构性质。本研究表明,与未间伐对照相比,随间伐强度增强,林地表层土(0—10 cm),土壤容重变小,总孔隙度和非毛管孔隙度提高,土壤入渗特性也相对提高;但在10—20 cm的土层中,与对照相比,间伐对土壤容重、孔隙度均无显著影响。

(2) 植物根系与土壤性质密切相关,根系在土壤中的穿插产生横向、纵向的根孔(生物大孔隙)形成连通网络,根系衰老死亡形成的有机质促进土壤团聚体形成,根系的固结作用将土壤单粒粘结起来,改善了土壤的团粒结构和孔隙度,间接改善土壤入渗能力<sup>[22]</sup>。抚育间伐影响着林分内各个生态因子的变化,如光、温度、湿度的时空分布以及降水的再分配等<sup>[23]</sup>,改善了麻栎林下的光照、水分等条件,同时林分内种间、种内竞争减弱,促进林下更新及林下灌、草的生长,增加了土壤中的植物根系含量。由土壤入渗特征与土壤基本物理性质及根系结构指标相关性分析可知,土壤的渗透性由土壤基本物理性质和根系特征直接或间接共同影响,土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、根长密度、根表面积密度是影响该地区土壤渗透性的关键因素。综合间伐强度对土壤基本物理性质、根系特征的影响,本研究发现,间伐改善研究区内麻栎林下表层土的基本物理性质,同时使其土壤中植物根长密度、根表面积密度和根重密度3个根系结构指标均随间伐强度增强而升高,改善土壤渗透性。因此,对麻栎林进行适度抚育间伐可改善林内环境,促进林下植被更新,同时能更好地发挥桥山林区麻栎天然次生林的水土保持、生态环境保护功能,减少土壤侵蚀。

(3) 对不同间伐强度下麻栎林土壤水分渗透数据按照选定的人渗模型进行过程模拟,Philip模型拟合的 $R^2$ 值为0.84~0.98,在3个模型中最高,其拟合结果与实测数据的相关性最高,说明Philip模型能更准确地模拟该区域的土壤水分入渗过程。

#### 参考文献:

- [1] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报,2008,24(7):494-499.
- [2] 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.
- [3] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入参与贮水特征[J]. 水土保持学报,2004,18(6):1-5.
- [4] 牛云,刘贤德,张虎,等. 祁连山水源涵养林土壤渗透功能的分析与评价[J]. 西北林学院学报,2001,16(S):35-38.
- [5] 林代杰,郑子成,张锡洲,等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2010,24(1):33-36.
- [6] 王纪杰,俞元春,陈容,等. 不同栽培代次、林龄的桉树人工林土壤渗透性研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):78-82,103.
- [7] 范少辉,刘广路,漆良华,等. 闽西北不同经营时间毛竹林土壤渗透性研究[J]. 水土保持学报,2010,24(1):24-27,48.
- [8] 刘芝芹,黄新会,王克勤. 金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2014,28(2):57-62.
- [9] 张昌顺,范少辉,官凤英,等. 闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子[J]. 林业科学,2009,45(1):36-42.
- [10] Dunkerley D. Effect of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia [J]. Hydrological Processes, 2012,26(15):2211-2224.
- [11] Duan R, Fedler C B, Borrelli J. Field evaluation of infiltration models in lawn soils [J]. Irrigation Science, 2011,29(5):379-389.
- [12] 陈家林,孔玉华,裴丙,等. 太行山低山丘陵区不同植被类型土壤渗透特性及影响因素[J]. 水土保持研究,2016,23(4):60-65.
- [13] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils [J]. Geoderma, 2008,145(3/4):295-302.
- [14] 曹旭平,张文辉. 陕西桥山省级自然保护区综合科学考察报告[M]. 陕西杨凌:西北农林科技大学出版社,2015.
- [15] 李荣,张文辉,何景峰,等. 不同间伐强度对辽东栎林群落稳定性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(1):14-20.
- [16] 苏芳莉,刘明国,迟德霞,等. 间伐强度对天然次生林凋落物性质的作用效果分析[J]. 土壤通报,2007,38(6):1096-1099.
- [17] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [18] 刘道平,陈三雄,张金池,等. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J]. 应用生态学报,2007,18(3):493-498.
- [19] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗与产流产沙过程[J]. 水科学进展,2014,25(2):190-195.
- [20] 高婵婵,余凯,赵传燕,等. 黄土丘陵区安家沟流域土壤入渗特性空间变异的研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(4):90-95.
- [21] 王利东. 不同间伐抚育强度对华北落叶松人工林土壤物理性质变化影响的研究[J]. 河北林果研究,2012,27(1):6-9.
- [22] Czames S, Hallett P D, Bengough A G, et al. Root and microbial-derived mucilage's affect soil structure and water transport [J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51(3):435-443.
- [23] 朱教君,康宏樟,胡理乐. 应用全天空照片估计林分透光孔隙度(郁闭度)[J]. 生态学杂志,2005,24(10):1234-1240.