

秦岭北坡刺槐人工林细根垂直分布及其与土壤养分的关系*

燕 辉¹, 苏印泉¹, 李吉平¹, 朱昱燕², 季志平¹

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 北京工商大学 北京市植物资源研究开发重点实验室, 北京 100037)

摘 要:采用土钻法对秦岭北坡刺槐人工林 3 种细根参数垂直分布状况和土壤化学性质进行系统研究。并在对这两者进行研究的基础上,就土壤养分因子对细根垂直分布的影响进行分析。研究发现,随着土层深度的增加,刺槐林细根参数总体上表现为降低的趋势。多种土壤养分因子在土层中表现出各自不同的变化趋势。细根参数在土层中的垂直分布受到土壤养分因子的重要影响。其中土壤有机质和全氮含量对细根参数在土层中垂直分布的影响最为明显。而在细根生物量、细根表面积、根长密度 3 种细根参数中,植物对养分的吸收与细根表面积的关系最为密切。

关键词:秦岭北坡;刺槐林;细根分布;土壤养分

中图分类号:S792.27;S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)03-0065-04

Distribution Characters of Fine Root of Artificial Robinia pseudoacacia Forests and Its Relation to Soil Nutrients in the Northern Slope of Qinling Mountains

YAN Hui¹, SU Yin-quan¹, LI Ji-ping¹, ZHU Yu-yan², JI Zhi-ping¹

(1. College of Forestry Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Beijing Key Lab of Plant Resources Research and Development, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China)

Abstract: Soil coring is used to investigate the vertical distribution of three kinds of fine root parameters and the chemical characteristics of artificial *Robinia pseudoacacia* forests soil in the northern slope of Qinling Mountains. And the influence of soil nutrients on the vertical distribution of the fine root is analyzed on the basis of the research of the two areas. It is revealed that the fine root parameters distribution in the soil decrease with the increase of soil depth. Many of the soil nutrient factors show different changes of their own. The vertical distribution of the fine root parameters in the soil is influenced by the soil nutrient factors. The influence of the soil organic matter and total nitrogen on the vertical distribution of the fine root parameters is the most positive. Among the three kinds of fine root parameters (fine root biomass, fine root surface area, fine root length density), fine root surface area has the most close relation with the nutrient acquisition.

Key words: the northern slope of Qinling Mountains; *Robinia pseudoacacia* forests; distribution characters of fine root; soil nutrients

细根是根系的重要组成部分,植物生长所需的水分和养分主要是由细根从土壤中摄取^[1]。因此,对细根分布、动态变化以及细根与环境条件关系的研究,是当前地下生态学研究的热点。细根的垂直分布特征,不仅受制于树种本身的特性,而且在很大程度上还受制于土壤环境因子,是树种特性与土壤环境因子共同作用的结果。一些研究认为,细根生物量随着土层深度的变化而变化^[2-4],主要由于受到土壤理化性质和养分含量的影响^[5]。张小全等^[6]认为土壤养分直接影响细根活力和碳水化合物的分配,从而影响树木细根生产和周转。因此,把细根分布特征与土壤养分状况结合起来进行研究,能更好地了解 and 预测植物细根的分布特征。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为豆科刺槐属(*Robinia*)的代表性植物,起源于美国北纬 43°-45°,于 19 世纪末从欧洲引入我国,故名洋槐。刺槐具有较强的生态适应性和优良的

经济价值,在全球范围内目前已成为仅次于杨树和桉树的第三大阔叶树种。本试验对秦岭北坡刺槐人工林细根垂直分布状况及其与土壤养分因子的关系进行研究,力求为揭示细根与土壤养分因子的动态作用机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于秦岭北坡户县南部山区,该区地理位置为东经 108°22' - 108°46',北纬 33°46' - 34°16',属暖温带半湿润大陆性季风气候。研究地点平均海拔 600 m,年平均气温 11~12℃,最热月 7 月平均气温 24℃,最冷月 1 月平均气温 -3℃,极端最低气温 -22℃,年降水量 800 mm 左右,无霜期 200 d。植被类型为针阔叶混交林,其间穿插部分退耕还林地,主要植被有刺槐、杨树、油松、侧柏、柿树、榆树、胡枝子

* 收稿日期:2008-03-26

基金项目:陕西省林业厅国际合作项目“日元贷款陕西省植树造林生态环境监测”

作者简介:燕辉(1984-),男,河南永城人,在读硕士,主要从事森林培育研究。E-mail:hnyanhui@yeah.net

通信作者:苏印泉(1954-),男,陕西白水人,教授,主要从事森林培育及资源利用研究。E-mail:syq9009@126.com

等。土壤以褐土、棕色森林土为主。

研究对象为人工刺槐林,乔木层盖度为 60%,其中刺槐占绝对优势。刺槐林平均林龄为 35 a,平均树高 9.10 m,平均胸径 9.82 cm,平均冠幅 4.2 m。灌草层盖度为 30%~60%。地表植被除刺槐外,主要还有构树(*Broussonetia papyrifera*)、野蒜(*Allium macrostemon*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、求米草(*Oplismenus undulatifolius*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 根样获取及处理

2007 年 7 月下旬进行根样的采集。细根采集采用土钻法,在刺槐林中选择林相整齐,代表性强的典型林地,在林地中按“M”型均匀布设 5 个样点,各样点用土钻($\phi=9\text{ cm}$)从 0-80 cm 分土层(10 cm 为一层)钻取土样。将钻取的土样编号后放入密封袋内密封带回,在实验室用筛孔为 0.2 mm 筛子反复淘洗,洗净土壤颗粒后放入蒸发皿中,根据根系的外形、气味、颜色等辨认刺槐根系并挑出,将刺槐根系按直径 2 mm 和 $>2\text{ mm}$ 分为 2 级。然后用根系扫描仪及根系形态学和结构分析应用系统 DT-SCAN[Delta-T Devices Ltd,U.K]对直径 $<2\text{ mm}$ 的根系进行根长、根表面积等指标的测定分析,并计算根长密度。扫描后的根系样品置入 80℃ 烘箱中烘干至恒重,称重并记录细根生物量。

1.2.2 土壤化学指标测定

从样地表面每 10 cm 为 1 层分 8 层采集土样,带回实验室风干后过筛,分别测定土壤化学指标。其中土壤有机质采用重铬酸钾外加热氧化法,全氮采用凯氏蒸馏法,速效氮采用碱解扩散法,全磷采用 NaOH 烧融钼锑抗比色法,速效磷采用 NaHCO_3 浸提钼锑抗比色法,全钾采用 NaOH 烧融火焰光度法测定,速效钾采用 1 mol/L NH_4Ac 浸提火焰光度法测定。

1.3 数据分析

在数据分析和处理中,主要采用 SPSS 13.0 统计软件,用回归分析,One-Way ANOVA 方差分析和相关分析。

2 结果分析

2.1 细根参数垂直分布特征

2.1.1 细根生物量垂直分布特征

图 1 表明,在刺槐林 0-30 cm 土层,随着土层深度的增加,细根生物量表现为较大幅度降低;30-40 cm 土层与 40-50 cm 土层,细根生物量相同;50-70 cm 土层,细根生物量随着土层深度的增加略有增加;之后随土层深度增加,细根生物量又呈减少趋势。其中 0-10 cm 土层细根生物量最大,为 0.57 mg/cm^3 ,占 0-80 cm 土层总生物量的 20.5%;其次为 10-20 cm 土层,占总生物量的 17.6%;70-80 cm 土层细根生物量最小,仅占总生物量的 6.8%。可见,0-20 cm 土层细根生物量占总细根生物量的近 40%,是细根生物量的集中分布区。

2.1.2 细根表面积垂直分布特征

图 2 表明,在 0-60 cm 土层中,刺槐林细根表面积基本上随土层深度的增加而逐渐减少,60-70 cm 土层细根表面

积较前层有所增加,之后又呈现出降低趋势。最大细根表面积与最小细根表面积分别分布在 0-10 cm 和 70-80 cm 土层,前者约为后者的 3 倍。0-10 cm 土层细根表面积占总细根表面积的 22.4%,10-20 cm 土层为 15.6%,二者共占 38%。可见,细根表面积与细根生物量一样,主要分布于 0-20 cm 土层。

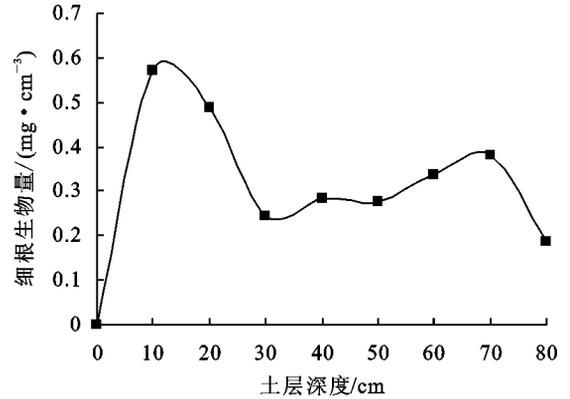


图 1 刺槐林细根生物量垂直分布特征

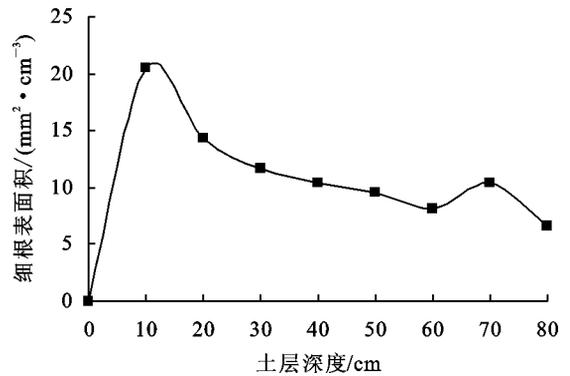


图 2 刺槐林细根表面积垂直分布特征

2.1.3 细根根长密度垂直分布特征

图 3 表明,在整个刺槐林 0-80 cm 土层中,细根根长密度与细根表面积具有相似分布规律:根长密度在 0-60 cm 土层中随土层深度的增加而逐渐减少,在 60-70 cm 土层略有增加,之后又呈减少趋势。最大与最小细根根长密度分布情况与细根生物量,细根表面积相同,分布在 0-10 cm 和 70-80 cm 土层。总体而言,细根根长密度在 0-80 cm 土层随土层深度的增加基本上呈减少趋势。

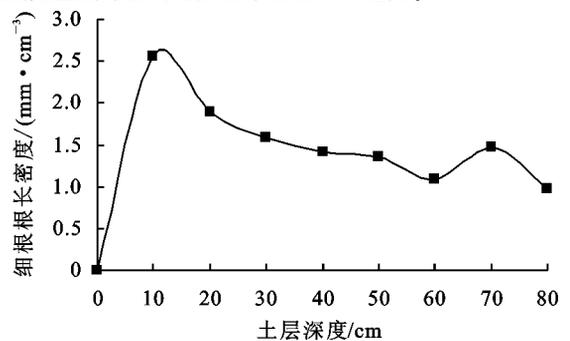


图 3 刺槐林细根根长密度垂直分布特征

2.2 细根参数深度分布的最优曲线回归方程

为探讨秦岭北坡刺槐林细根各参数在不同土层的分布

规律,采用线性、多项式、幂函数、指数函数、对数函数、复合函数等 6 种函数,分别对刺槐林细根生物量、细根表面积、根长密度在不同土层中的分布进行拟合,发现 6 种函数中拟合优度最高的均为三次方程(表 1)。由方程可知,各细根参数先是随土层加深呈现出较大幅度的减少趋势,表明细根参数集中分布在土壤表层。而较下层细根参数变化的幅度趋于平缓,则表明下层细根参数分布相对较少且变化不大。总之,3 种细根参数随土层深度的增加基本上呈减少趋势。

表 1 细根参数深度分布的 3 次方程

细根参数	三次方程	R ²
细根生物量	$y = 1.000 - 0.049x + 0.001x^2 - 7.06 \times 10^{-6}x^3$	0.836
细根表面积	$y = 29.541 - 1.104x + 0.020x^2 + 0.000x^3$	0.963
根长密度	$y = 3.549 - 0.121x + 0.002x^2 - 1.37 \times 10^{-5}x^3$	0.935

2.3 林地土壤养分的空间分布特征

对秦岭北坡刺槐林有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾等多种土壤养分因子空间分布状况进行研究,发现随土层深度的变化,各种土壤养分因子表现出各自的空间分布特征。

表 2 刺槐林土壤养分的空间分布特征

土层深度/ cm	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	速效氮/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
0 - 10	22.92 a	1.45 a	102.32 a	0.60 a	1.60 c	21.26 a	177.93 a
10 - 20	10.57 b	0.71 b	36.65 c	0.54 b	1.28 de	21.49 a	97.30 e
20 - 30	10.14 c	0.65 c	44.51 b	0.42 c	0.79 f	20.11 b	115.90 b
30 - 40	4.56 d	0.37 e	23.34 d	0.24 g	1.10 e	19.77 b	111.23 c
40 - 50	4.17 e	0.32 fg	18.54 f	0.25 fg	1.47 cd	19.76 b	96.70 e
50 - 60	4.35 de	0.46 d	19.42 f	0.25 f	1.57 c	19.10 c	77.53 g
60 - 70	4.31 de	0.32 f	21.38 e	0.26 e	2.19 b	19.99 b	102.87 d
70 - 80	3.53 f	0.29 g	18.76 f	0.27 d	2.83 a	19.87 b	91.53 f

注:表中同列标有不同字母的数值表示差异在 P=0.05 水平上达到显著。

2.4 细根参数与土壤养分的相关性分析

植物根系的分布特征不仅取决于自身的遗传特性,而且在很大程度上受所处土壤环境的影响。Burke 等^[8]研究发现,无论细根生物量、根长密度和比根长如何变化,都是土壤资源的有效性性与树木自身内在因子(如分配格局)综合作用的结果。对秦岭北坡刺槐林细根参数与土壤养分因子进行相关性分析(表 3)表明,在土壤有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾等多种土壤养分因子中,除土壤速效磷外,其它土壤养分因子与刺槐林细根参数具有不同程度的相关性。其中,土壤养分因子与细根生物量相关性强弱依次为:全氮($r = 0.791$) > 有机质($r = 0.771$) > 全磷($r = 0.760$) > 全钾($r = 0.746$) > 速效氮($r = 0.721$) > 速效钾($r = 0.613$);与细根表面积相关性强弱依次为:有机质($r = 0.956$) > 全氮($r = 0.942$) > 速效氮($r = 0.932$) > 全磷($r = 0.889$) > 速效钾($r = 0.886$) > 全钾($r = 0.823$);与根长密度相关性强弱依次为:有机质($r = 0.939$) > 全氮($r = 0.917$) > 速效氮($r = 0.913$) > 全磷($r = 0.883$) > 速效钾($r = 0.879$) > 全钾($r = 0.836$)。各种不同土壤养分因子与刺槐林细根参数有强弱不同的相关性,说明不同养分因子对刺槐林细根参数分布有不同程度的影响。研究中还发现,除了与全钾相

有机质是各种营养元素特别是氮磷的主要来源,是土壤肥力高低的一个重要指标^[7],表 2 表明,土壤有机质表层含量最高,表聚效应明显;下层含量则较低。总体而言,土壤有机质在 0 - 80 cm 土层基本上随土层深度的增加表现为减少的趋势。

土壤中全氮、全磷、全钾含量主要决定于植物体养分循环过程和土壤的成土母岩类型(主要是磷、钾)。表 2 表明,在这 3 种土壤养分因子中,土壤全氮表现出与土壤有机质相似分布规律,其含量基本上随土层深度的增加而减少。而随土层深度的增加,土壤全磷含量表现为先降低后增加的抛物线变化趋势。与土壤中全氮、全磷含量垂直分布不同,随着土层深度的增加,土壤全钾含量的变化呈现波动趋势。

表 2 表明,土壤中速效氮、速效磷、速效钾含量随着土层深度的变化,也表现出各自的空间分布特征。速效氮、速效钾的含量随土层深度的变化呈现出较为相似的空间分布规律,均随土层深度的增加呈现出复杂的波动变化趋势。与速效氮、速效钾分布规律不同,速效磷的分布随土层深度的增加呈现出先降低后增加的抛物线变化趋势。

表 3 刺槐林不同土层深度细根参数与土壤养分因子相关分析

细根参数	土壤养分因子	相关系数	显著水平
细根生物量	有机质	0.771	0.025
	全氮	0.791	0.020
	速效氮	0.721	0.044
	全磷	0.760	0.029
	速效磷	- 0.170	0.687
	全钾	0.746	0.033
	速效钾	0.613	0.106
细根表面积	有机质	0.956	0.000
	全氮	0.942	0.000
	速效氮	0.932	0.001
	全磷	0.889	0.003
	速效磷	- 0.346	0.401
	全钾	0.823	0.012
	速效钾	0.886	0.003
根长密度	有机质	0.939	0.001
	全氮	0.917	0.001
	速效氮	0.913	0.002
	全磷	0.883	0.004
	速效磷	- 0.355	0.389
	全钾	0.836	0.010
	速效钾	0.879	0.004

关性 ($r=0.823$) 略弱于根长密度与全钾相关性 ($r=0.836$) 外, 细根表面积与各养分因子相关性基本最强, 根长密度与各养分因子相关性次之, 细根生物量与各养分因子相关性最弱, 这是土壤养分对各细根参数影响程度不同造成的结果。

3 讨论

细根的空间结构是反映地下部分协调生长的重要内容, 因此关于植物细根空间分布特征的研究是目前生态学研究的热点之一^[9]。Gale 和 Grigal^[10]提出了一个关于根系生物量垂直分布的模型来反映根系生物量垂直分布特征与土层深度的关系。Jackson 等^[11]研究发现不同地区不同树种的根系在土层中的分布状况存在差别。许多研究表明^[12-14], 林木细根生物量一般随土层加深而减少。在本试验中, 刺槐林不仅细根生物量随土壤深度的增加而减少, 而且表征细根垂直分布特征的细根表面积、根长密度基本上均随土壤深度的增加而呈减少趋势。采用多种函数对刺槐林 3 种细根参数在不同土层中的分布进行拟合发现, 三次方程是对秦岭北坡刺槐林细根参数垂直分布与土层深度关系进行描述的一种拟合优度最佳函数, 各细根参数的变化趋势基本上可用三次方程来解释。土壤有效养分含量是生态系统的重要属性之一, 存在着空间和时间上的变化^[15]。对秦岭北坡刺槐林 0-80 cm 土层土壤有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾等多种养分因子空间分布状况进行研究, 多种土壤养分的空间变化趋势各不相同, 每种土壤养分在不同土层中含量差别显著。

由于土壤环境具有高度的异质性, 因此不同土层深度根系的生长、分布不仅受自身遗传特性的影响, 而且也受土壤环境的影响^[16]。Vogt 等^[17]通过收集的大量研究数据分析, 发现细根生产主要受养分条件的控制。张小全认为^[6], 林地表层土壤丰富的养分条件是细根多集中分布于表层的重要原因之一。本试验对秦岭北坡刺槐林细根参数与土壤养分进行相关性分析, 结果表明: 细根参数在土层中的垂直分布受到土壤养分的重要影响。这与许多研究结果^[18-20]相一致。在多种土壤养分因子中, 与细根生物量相关性最强、关系最密切的是土壤全氮, 其次为土壤有机质; 与细根表面积、根长密度相关性较强的依次分别为土壤有机质、全氮、速效氮。这说明土壤有机质、氮素含量对细根分布的影响程度最大。而土壤磷、钾等养分与细根参数的相关性相对较弱, 则表明土壤磷、钾等养分对细根分布的影响程度相对较小。可见, 在多种土壤养分中, 细根的垂直分布更多地受到土壤有机质和氮素含量的控制。植物为尽可能多地从土壤中获得养分, 特别是从土壤中获得有机质和氮素满足自身需要, 细根分布需要随土壤养分含量, 特别是土壤有机质、氮素含量变化而变化, 这也是植物适应空间异质性的策略。

刘建军^[21]研究发现, 在生态学的研究中, 根系表面积是研究水分吸收或养分吸收的重要的参数之一。何维明^[22]认为根系表面积是比根系生物量能更好反映根系空间分布特征的指标。本研究发现, 在反映秦岭北坡刺槐林细根生长和分布特征的各项细根指标中, 相对于细根根长密度和生物

量, 细根表面积与各养分因子的相关性最强, 关系最密切。这是因为, 根系表面积是根系与土壤之间进行营养交换的界面^[23], 受到土壤养分异质性的影响程度要大于细根根长密度和生物量。可见, 细根表面积是对土壤养分资源的反映比细根根长密度和生物量更为敏感的参数。

参考文献:

- [1] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents [J]. Ecology Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1997, 94: 7362-7366.
- [2] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 等. 长白山几种主要森林群落木本植物细根生物量及其动态 [J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2855-2862.
- [3] 董慧霞, 李贤伟, 张健, 等. 退耕地三倍体毛白杨林地细根生物量及其与土壤水稳性团聚体的关系 [J]. 林业科学, 2007, 43(5): 24-29.
- [4] 杨丽韞, 李文华. 长白山原始阔叶红松林细根分布及其周转的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 1-5.
- [5] Keyes M R, Grier C C. Above and below-ground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1981, 11: 599-605.
- [6] 张小全. 环境因子对树木细根生物量、生产与周转的影响 [J]. 林业科学研究, 2001, 14(5): 566-573.
- [7] 南京农业大学. 土壤农化分析 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 33-89.
- [8] Burke M K, Raynai D J, Mrrchell M J. Soil nitrogen availability influences seasonal carbon allocation patterns in sugar maple (*Acer saccharum*) [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 22: 447-456.
- [9] 韦兰英. 黄土高原不同演替阶段草地植被细根分布及其生态特征研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [10] Gale M R, Grigal D E. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status [J]. Can J. For. Res., 1987, 17: 829-834.
- [11] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996, 108: 398-411.
- [12] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原子午岭天然柴松林细根垂直分布特征 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 70-74.
- [13] Canadell J, Roda F. Root biomass of *Quercus ilex* in amontane Mediterranean forest [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21: 1771-1778.
- [14] Davis J P, Haines B, Coleman D, et al. Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains [J]. USA For Ecol Manage, 2004, 187: 19-34.

43.85%、46.84%、25.91%、36.55%和 61.13%。坡耕地和土质路面的土壤入渗特征值最小,分别为灌草坡地土壤初始入渗率的 8.86%和 2.08%;前 5 min 平均入渗率的 8.23%和 1.1%;饱和导水率的 8.97%和 1.33%。

根据数据分析,可以将各地类划分为 3 类。第一类,饱和导水率 $> 2.5 \text{ mm/min}$,分别为次生林地、灌草坡;第二类,饱和导水率介于 $1.0 \sim 2.5 \text{ mm/min}$,主要是各类人工林地;第三类,饱和导水率 $< 1.0 \text{ mm/min}$ 以下,分别为侧柏林地、坡耕地和土质路面。

研究表明,在黄土高原地区应该大力发展天然次生林,也就是说如何将现有人工林通过抚育管理措施,转化为近自然林,这样水土保持林才能发挥最大的水源涵养和水土保持作用。土质路面的初渗速率,前 5 min 平均入渗速率、饱和导水率都非常小,仅为天然次生林地的 2.08%、1.10%和 1.33%。降雨时路面首先会产生地表径流,形成的地表径流沿路面流动过程中冲刷路面产生侵蚀,而黄土区的山路大部分为没有硬化的土质路面,因此,土质道路是黄土区侵蚀、产生泥沙的主要来源之一。因此,黄土区道路建设中如何控制路面水土流失是山区建设中急需解决的问题。

4 结 论

(1) 土壤饱和导水率与土壤非毛管孔隙度、土壤总孔隙度均呈正相关,与土壤容重呈负相关。

(2) 在相同坡向条件下,土壤初始入渗率、饱和导水率随坡位变化呈现以下规律:坡下部 $>$ 坡中部 $>$ 坡上部。

(3) 在相同坡位条件下,土壤初始入渗率、饱和导水率随坡向变化呈现以下规律:阴坡 $>$ 阳坡。

(4) 将不同土地利用类型坡面土壤入渗性能划分为 3 个等级。第一级,饱和导水率 $> 2.5 \text{ mm/min}$,分别为次生林地、灌草坡;第二类,饱和导水率介于 $1.0 \sim 2.5 \text{ mm/min}$,主要是各类人工林地;第三类:饱和导水率 $< 1.0 \text{ mm/min}$,分别为侧柏林地、坡耕地和土质路面。

参考文献:

[1] Helalia A M. The relationship between soil infiltration

and effective porosity in different soils[J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(8): 39-47.

[2] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil[J]. Soil Science Soc. AM. J., 1944, 8(2): 166-182.

[3] Hillel D. Crust formation in lassies soils[J]. International Soil Science, 1960, 29(5): 330-337.

[4] 蒋定生, 黄国俊, 谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 7-9.

[5] 蒋定生, 黄国俊. 地面坡度对降雨入渗影响的模拟试验[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 10-13.

[6] 贾志军, 王贵平, 李俊义, 等. 土壤含水率对坡耕地产流影响的研究[J]. 山西水土保持科技, 1990, 22(4): 25-27.

[7] 袁建平, 雷廷武, 郭彦彦, 等. 黄土丘陵区小流域土壤入渗速率变异性[J]. 水利学报, 2001, 10(5): 88-92.

[8] 赵西宁, 吴发启, 王万忠. 黄土高原沟壑区坡耕地土壤入渗规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(4): 109-112.

[9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

[10] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 36-42.

[11] Edwards W M, Norton L D, Redmond C E. Characterizing macrospores that affect infiltration into no tilled[J]. Soil Science Society of American Journal, 1993, 157: 1586-1594.

[12] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异性[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 579-583.

[13] 夏江宝, 杨吉华, 李红云. 不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 115-117.

[14] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 1-5.

(上接第 68 页)

[15] Cain M L, Subler S, Evans J P, et al. Sampling spatial & temporal variation in soil nitrogen availability[J]. Oecologia, 1999, 118: 397-404.

[16] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4164-4169.

[17] Vogt K A, Vogt D J, Vogt P A, et al. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species [J]. Plant and Soil, 1996, 187: 159-219.

[18] 杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林及其次生林细根生物量与垂直分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3609-3617.

[19] 梅莉, 王政权, 韩有志, 等. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 1-4.

[20] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 611-619

[21] 刘建军. 秦岭油松、锐齿栎根系生态研究[M]. 西安: 西北大学出版社, 2002: 36.

[22] 何维明. 不同生境中沙地柏根表面积分布特征[J]. 林业科学, 2000, 36(5): 17-21.

[23] 王佑民, 刘秉正. 黄土高原防护林生态特征[M]. 北京: 中国林业出版社, 1994: 57.