

坝上地区不同退化程度小叶杨细根分布特征

武娟娟¹, 邱云霄¹, 王渝淞¹, 余新晓¹, 陈丽华¹, 贾国栋¹, 邱贵福²

(1.北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083;2.塞北林场,河北 张家口 076550)

摘要: 为了研究坝上地区不同退化程度小叶杨的细根分布特征,使用土柱法对比了未退化、中度退化和重度退化小叶杨的细根在水平和垂直方向的根系参数的分布规律以及差异,并分析了根系参数在不同土层中的占比。结果表明:(1)随着林地土壤含水率逐渐减小,小叶杨的退化程度加重,细根在表层的占比逐渐增加,在深层的占比逐渐减小。(2)在垂直方向上,3 种退化程度小叶杨的细根生物量在 0—20 cm 土层显著高于其他土层($P<0.05$),并随土层加深而出现细根的根长密度、根表面积密度、根体积密度的较明显下降趋势。在 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层,细根的根表面积密度和根体积密度均表现为未退化>中度退化>重度退化。(3)在离开树干的水平方向上,未退化和中度退化小叶杨的细根的根长密度呈现出先增加后减小的变化趋势,而重度退化在 0—50,50—100,100—150 cm 处相差不大,在 150—200 cm 处显著增加并达到最大($0.465\ 7\ \text{cm}/\text{cm}^3$)($P<0.05$)。细根的根表面积密度和根体积密度在 4 个水平距离上均表现为未退化>中度退化>重度退化,未退化小叶杨的细根生物量均为最大(19.53,15.74,14.17,14.20 g)。根体积密度整体上随水平距离增加而逐渐减小。研究结果可为探索防护林的细根分布格局和退化原因以及为指导坝上高原地区的植被恢复与重建提供科学参考。

关键词: 坝上地区;小叶杨;退化;细根;分布特征

中图分类号:S792.11

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)05-0242-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.033

Fine Roots Distribution Characteristics of *Populus simonii* with Different Degradation Degrees in Bashang Area

WU Juanjuan¹, QIU Yunxiao¹, WANG Yusong¹, YU Xinxiao¹,

CHEN Lihua¹, JIA Guodong¹, QIU Guifu²

(1.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Ministry of

Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Forest Farm of Saibei, Zhangjiakou, Hebei 076550)

Abstract: In order to study the distribution characteristics of the fine roots of *Populus simonii* with different degradation degrees in Bashang area, this paper used soil column method to compare the distribution rules and difference of fine root parameters in horizontal and vertical directions in *P. simonii* stands with different degradation degrees (no degradation, moderate degradation and severe degradation), and analyzed the proportion of root parameters in different soil layers. The results showed that: (1) With the decreasing of soil moisture content, the degradation degree of *P. simonii* increased, the proportion of fine roots in the surface layer increased, and its proportion in the deep layer decreased. (2) In the vertical direction, the fine root biomass of *P. simonii* in 0—20 cm soil layer was significantly higher than that in other soil layers ($P < 0.05$), and the root length density, root surface area density and root volume density decreased significantly with the deepening of soil layer. In 0—20, 20—40, 40—60, 60—80 and 80—100 cm soil layers, the root surface area density and root volume density of fine roots followed the order of no degradation>moderately degradation>severely degradation. (3) In the horizontal direction away from the trunk, the root length density of fine roots increased at first and then decreased in no degeneration and moderately degeneration stands, while there was no significant difference among 0—50, 50—100 and 100—150 cm soil layers in

收稿日期:2021-04-22

资助项目:国家重点研发计划项目(2020YFF0305905-03)

第一作者:武娟娟(1996—),女,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:1977168557@qq.com

通信作者:余新晓(1961—),男,博士,教授,主要从事森林水文、水土保持研究。E-mail:yuxinxiao1111@126.com

severely degenerated *P. simonii* stand, and that increased significantly in 150—200 cm soli layer and reached the maximum (0.465 7 cm/cm³) ($P < 0.05$). The root surface area density and root volume density of fine roots all followed the order of no degradation>moderately degradation>severely degradation at four horizontal distances. The fine root biomasses of no degraded *P. simonii* were all the largest (19.53, 15.74, 14.17 and 14.20 g). The root volume density decreased with the increasing of horizontal distance. The results of this study could provide a scientific reference for exploring the fine root distribution pattern and degradation reasons of shelterbelts, and for guiding the vegetation restoration and reconstruction in Bashang plateau.

Keywords: Bashang area; *Populus simonii*; degradation; fine roots; distribution characteristics

从上世纪 50 年代开始,张北坝上地区便开始大规模地营造以杨树为主的人工防护林,作为阻挡风沙入京的一道重要防线^[1],同时也在保持水土、涵养水源、控制风沙、减少土壤侵蚀、调节区域小气候、提高作物产量等方面发挥了重要作用。在前期建设中,防护林主要种植成本低、生长快的小叶杨(*Populus simonii*)。近些年来,防护林出现大面积衰退和死亡,退化面积约 8.1 万 hm²,占当地杨树防护林总面积的 79.5%^[2]。对其原因有不同猜测:一是认为树龄超过 30 年后一般就进入成熟期,树木生理功能衰退,最终导致死亡^[3];二是认为极端气候频发和人为干扰加强使杨树出现生长不良、枯梢明显、大面积枯死等退化;三是认为水分不足可能是张北地区植物生长的主要限制因子^[4],同时粗放经营也是重要原因。因此,开展防护林退化机制研究有重大的现实意义。

有不少学者针对防护林退化在林分结构^[5-6]、树木生理^[7]、水分来源^[8]、根系分布^[9]、气候环境^[10-11]等方面做了大量研究。孙守家等^[12]、苗博等^[3]研究发现,退化小叶杨主要利用土壤浅层水分,未退化小叶杨主要利用土壤深层水分;孜尔蝶·巴合提等^[8]研究发现,随着退化程度加重,小叶杨的主要水分来源从深层土壤水逐渐转移到表层土壤水;郑春雅等^[9]认为,杨树的根系分布土层较浅,根系生物量主要分布在 0—50 cm 土层。细根是指直径<2 mm 的根,因有巨大的吸收表面积,成为植物吸收水分和养分的主要器官^[13]。为了充分明确根系的吸水潜力,掌握细根的空间分布格局尤为重要。了解细根形态的变化能较好地反映根系对环境变化的不同适应策略^[14],对研究防护林退化具有重要意义。

目前对于防护林退化的研究主要集中在植物生理特征方面,由于工作量大以及试验不便,对不同退化程度小叶杨的细根分布格局研究还较少。所以,本文对坝上地区不同退化程度的小叶杨研究了细根在水平和垂直方向的根系参数分布规律,目的是明确不同退化程度小叶杨细根形态及分布的空间变异特征,为理解防护林退化原因及机制提供理论依据,也为坝上高原地区植被恢复与重建提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于河北省西北部坝上地区张北县(40°57′—41°34′ N, 114°10′—115°27′ E),平均海拔 1 750 m,是典型的农牧交错带地区。研究区属温带大陆性气候,为半干旱区。多年平均降水量 392.7 mm,南部相差较大,降水主要集中于 6—9 月;多年平均气温 10.1 ℃,全年活动积温 2 448 ℃;全年无霜期 90~120 天;每年约有 60 天的风力达到 6 级以上,以偏西风为主。土壤风蚀严重。土壤类型主要为栗钙土,土壤 pH 为 5.52~7.37。

本研究在张北县二台林场进行,其植被以 70 年代种植的小叶杨为主,林下以披针叶苔草(*Carex lanceolata*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)和草木犀(*Melilotus officinalis*)等耐寒的旱生多年生草本为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 根据收集的资料及实地调查情况,将二台林场内的小叶杨人工林依据枯梢率和林分生长状况^[15]及分布片区,划分为未退化、中度退化和重度退化 3 种退化程度。研究区海拔为 1 350 m 左右,在研究区选择树龄相同或相近的 20 年中龄林小叶杨,每种退化程度选取 3 棵相距较远的样树,总共 9 棵。样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息

退化程度	郁闭度/%	枯梢率/%	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m	
					东西	南北
未退化	77.2	0	13.24	20.10	5.20	3.70
中度退化	43.4	0~60	11.75	19.11	2.60	3.65
重度退化	18.7	>60	11.65	22.10	2.50	3.40

1.2.2 根系数据收集 于 2020 年 7 月,采用土柱法进行密集取样,从小叶杨的树干基部沿水平方向挖沟,在裸露的土壤剖面上进行土柱挖掘,剖面正对树干。在剖面上,按照离开树干 0~0.5,0.5~1.0,1.0~1.5,1.5~2.0 m 共 4 个水平距离,在 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 共 5 个土层深度取样,宽度为 10 cm,即土样规格为 50 cm(长)×20 cm(高)×10 cm

(宽),分别将土样挖出。每棵树 20 个土样,3 种退化程度共 9 棵树,共 180 个土样。用筛子将每块土样过筛,筛去多余土块,再将各土样中的根系拣出,分别装入塑封袋中并编号带回实验室进一步分析。

在离开树干 0~2 m 的裸露土壤剖面范围内,在上述 5 个深度采集土样,每层 3 个重复,土样放入铝盒内,用烘干法(105 ℃)测定土壤含水率。

将收集到的根系反复用水小心冲洗干净并阴干。将直径<2 mm 的活细根挑出,并放入根系扫描仪扫描,得到各土样细根的图片,然后用根系扫描软件 WinRHIZO 进行分析,得到细根的根长、表面积、根体积等参数。形态测定结束后,将根系样品放入 75 ℃ 的烘箱中烘干至恒重,然后用精度为 0.01 g 的天平称重,获得细根生物量。

$$RLD=\frac{RL}{V} \tag{1}$$

式中:RLD 为根长密度(cm/cm³);RL 为根系长度(cm);V 为土样体积(cm³)。

$$RSD=\frac{RS}{V} \tag{2}$$

式中:RSD 为根表面积密度(cm²/cm³);RS 为根系表面积(cm²)。

$$RVD=\frac{RV}{V} \tag{3}$$

式中:RVD 为根体积密度(mm³/cm³);RV 为根系体积(mm³)。

1.3 数据分析

利用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行预处理,用 SPSS 26 软件对细根的不同水平距离以及不同土层深度的参数进行单因素方差分析及 LSD 多重比较,差异显著水平设定为 α=0.05,使用 SigmaPlot 12.5 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同退化程度林地的土壤含水率

由图 1 可知,在 0—100 cm 土层内,各退化程度的林地土壤含水率存在显著差异($P<0.05$)。未退化林地的土壤含水率变化范围为 4.16%~9.77%,平均为 6.03%,明显高于重度退化的平均土壤含水率(4.68%),重度退化林地的土壤含水率变化范围为 3.26%~8.47%。整体上来看,随着林地土壤含水率逐渐减小,小叶杨退化程度加重。3 种退化程度林地土壤含水率的土层分布总体上呈现先降低后缓慢升高的趋势,在 0—20 cm 土层的土壤含水率均为最高,其中未退化林地最高(9.77%),中度退化与重度退化相差不大。未退化林地土壤含水率在 20—40 cm 土层达到最低,而中度退化和重度退化林地分别在

60—80,40—60 cm 土层达到最低。

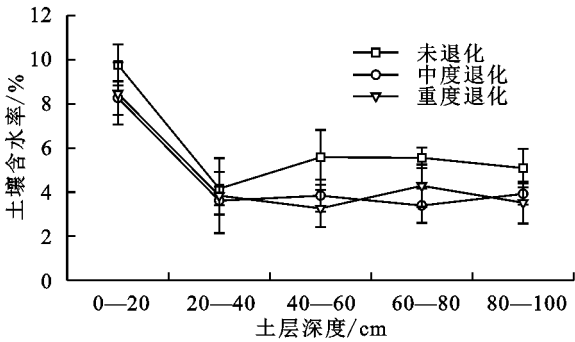


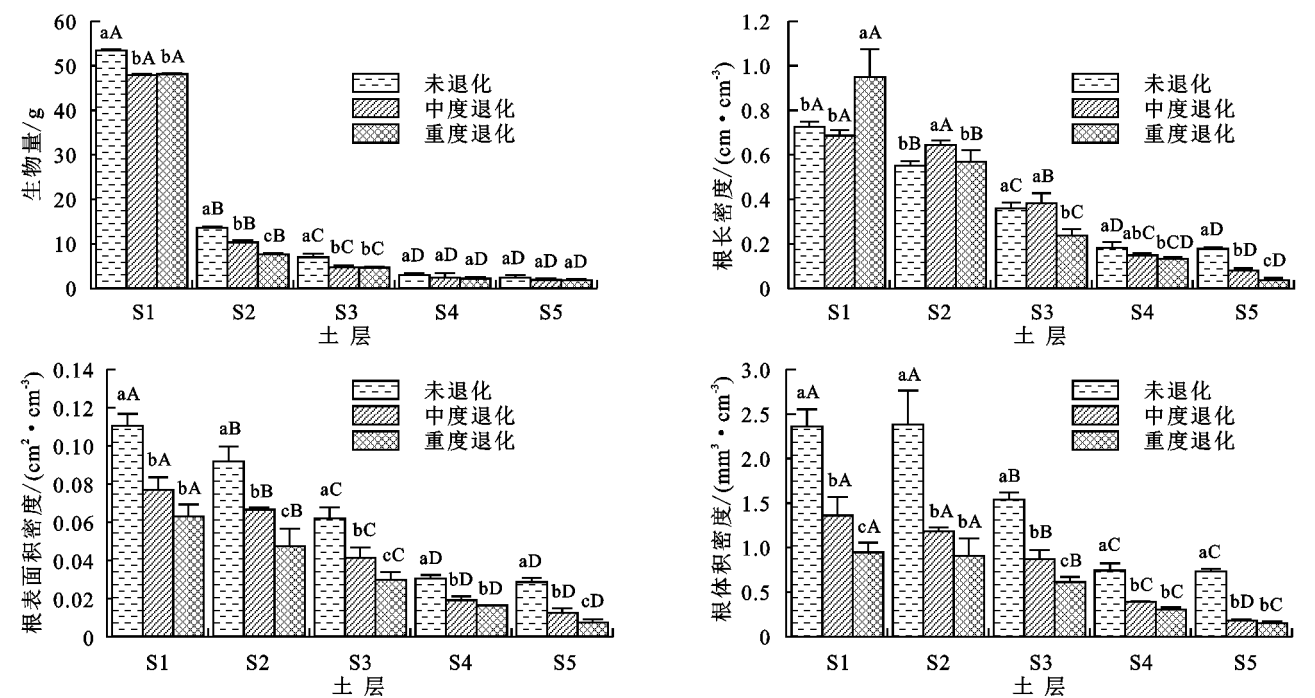
图 1 不同退化程度林地土壤含水率

2.2 不同退化程度小叶杨细根的垂直分布特征

细根形态的垂直分布是将同一土层内各土样细根数据进行平均所得。由图 2 可知,3 种退化程度小叶杨的细根生物量在垂直方向上的数值范围为 1.87~53.43 g,均随土层加深而显著减小($P<0.05$),在 S1 土层的生物量显著高于其他土层($P<0.05$),未退化的(53.43 g)显著高于中度退化的(47.94 g)和重度退化的(48.15 g)($P<0.05$),表明细根分布表层化,这也是因为表层土壤具有更好的水分和养分条件。3 种退化程度的小叶杨细根生物量分别在 S1、S2 与 S3 土层间差异显著($P<0.05$),在每个土层均为未退化的最大,中度退化的次之,重度退化的最小。在根长密度方面,3 种退化程度小叶杨的细根在垂直方向上的数值范围为 0.038 1~0.948 6 cm/cm³,其中重度退化的在 S1 土层中最大,为 0.948 6 cm/cm³,在 S5 土层中最小,为 0.038 1 cm/cm³。在 S1 土层,重度退化小叶杨的细根根长密度显著>未退化和中度退化的($P<0.05$);在 S2 土层,中度退化>重度退化>未退化,未退化和重度退化小叶杨细根根长密度差异不显著($P>0.05$);在 S3 土层,重度退化的根长密度最小,为 0.238 3 cm/cm³;在 S4 和 S5 土层,未退化的根长密度均为最大,中度退化的次之,重度退化的最小,在 S5 土层,3 种退化程度细根根长密度差异均显著($P<0.05$)。

3 种退化程度小叶杨的根表面积密度在垂直方向上的数值范围为 0.007 4~0.110 5 cm²/cm³,根体积密度在垂直方向上的范围为 0.154 4~2.380 5 mm³/cm³,均随土层加深而逐渐减小。在每个土层中,未退化小叶杨的细根根表面积密度和根体积密度均为最大,中度退化的次之,重度退化的最小。在 S1 土层中,中度退化和重度退化的根表面积密度和根体积密度都达到各自的最大值,中度退化的为 0.076 9, 1.361 8 mm³/cm³,重度退化的为 0.063 1, 0.947 4 mm³/cm³;在 S5 土层中,3 种退化程度小叶杨细根的根表面积密度和根体积密度都达到各自的最小值,未退化的为 0.028 6, 0.735 5 mm³/cm³,中度退化的为 0.012 5, 0.181 6 mm³/cm³,重度退化的为 0.007 4,

0.154 4 mm³/cm³。各土层中小叶杨细根的根表面积密度在不同退化程度之间差异显著(S4 除外)($P < 0.05$),根体积密度为未退化的显著大于中度和重度退化的(S1、S3 除外)($P < 0.05$)。



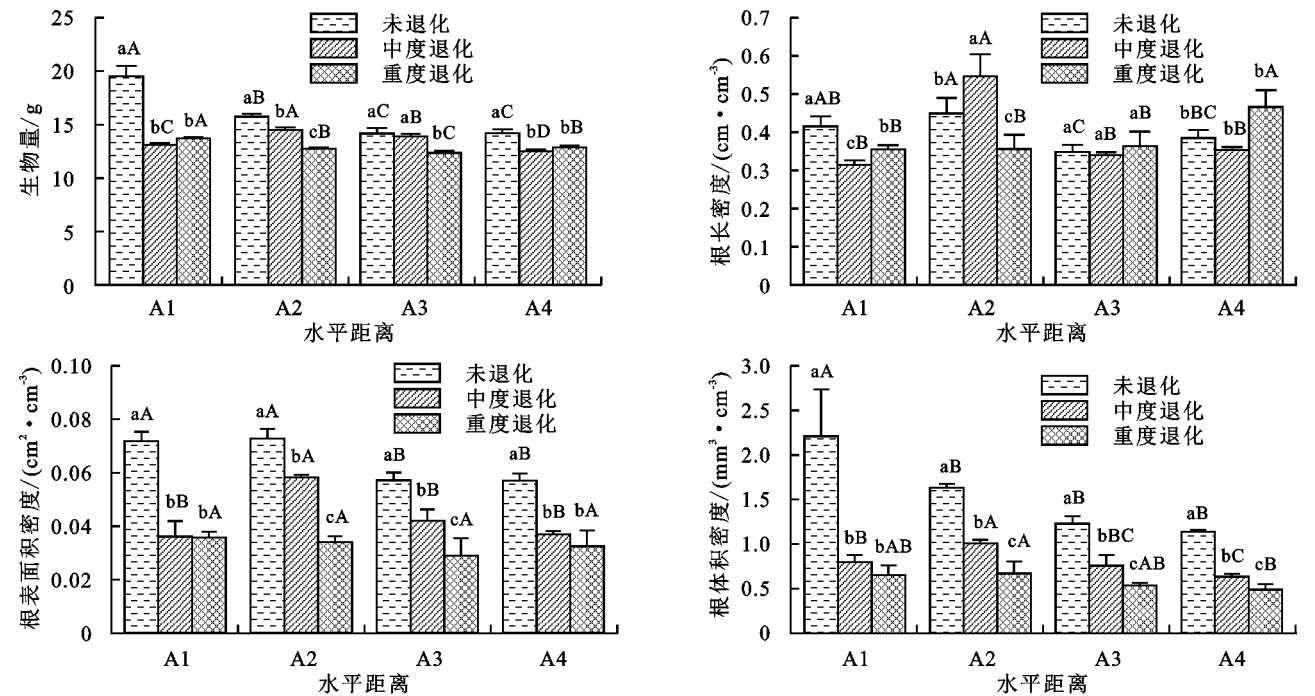
注:图中数值为平均值±标准差;S1、S2、S3、S4、S5 分别为 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层;图柱上方不同大写字母表示同一退化程度不同土层差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示同一土层不同退化程度差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 2 不同退化程度小叶杨细根参数的垂直分布

2.3 不同退化程度小叶杨细根的水平分布特征

细根形态的水平分布是将同一水平距离内各层土样细根的数据进行平均所得。由图 3 可知,3 种退化程度的细根生物量在水平方向上的数值范围为 12.35~19.53 g。未退化的生物量随距离增加逐

渐减小,中度退化则呈现先增后减的趋势,重度退化的在不同水平距离上差异不大。在 4 个水平距离上,未退化小叶杨细根的生物量均为最大(19.53,15.74,14.17,14.2g),在 A2 与 A3 处为未退化>中度退化>重度退化。



注:A1、A2、A3、A4 分别为距离树干 0~50,50~100,100~150,150~200 cm 的水平距离。

图 3 不同退化程度小叶杨细根参数的水平分布

3 种退化程度小叶杨的细根在水平方向上的根长密度大小范围为 0.314~0.547 cm/cm^3 ,未退化与

中度退化的均表现为在水平距离上从 A1 到 A4 先增后减再增的趋势,而重度退化的在 A1、A2、A3 处相差不大,在 A4 处显著增加并达到最大($0.465\ 7\ \text{cm}/\text{cm}^3$)。未退化小叶杨细根的根长密度最大值出现在 A2 处,为 $0.449\ 0\ \text{cm}/\text{cm}^3$,最小值出现在 A3 处,为 $0.348\ 8\ \text{cm}/\text{cm}^3$;中度退化小叶杨细根的根长密度最大值出现在 A2 处,为 $0.547\ 0\ \text{cm}/\text{cm}^3$,最小值出现在 A1 处,为 $0.314\ 0\ \text{cm}/\text{cm}^3$ 。3 种退化程度小叶杨的细根根长密度在 A1、A2 处均表现为差异显著($P<0.05$),在 A3 处差异均不显著($P>0.05$)。

3 种退化程度小叶杨的细根在水平方向上的根表面积密度大小范围为 $0.029\ 0\sim 0.072\ 8\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$,根体积密度大小范围为 $0.487\ 5\sim 2.208\ 5\ \text{mm}^3/\text{cm}^3$ 。未退化与中度退化的细根根表面积密度总体上呈现先增加后逐渐减小的趋势;中度退化小叶杨的细根根表面积密度在 A2 处最大,为 $0.058\ 2\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$,在 A1 处最小,为 $0.036\ 1\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$ 。未退化小叶杨细根的根体积密度随水平距离增加呈现逐渐减小趋势,而中度退化和重度退化的呈现先增加后减小的趋势。重度退化小叶杨的细根根表面积密度呈现从 A1 到 A3 逐渐减小到最小值 $0.029\ 0\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$,到 A4 略微增加到 $0.032\ 5\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$ 。未退化小叶杨的细根根表面积密度和根体积密度在 4 个水平距离上数值都是最大,中度退化的次之,重度退化的最小。3 种退化程度小叶杨的细根根表面积密度在 A2 和 A3 处均表现为差异显著($P<0.05$),根表面积密度在 A2、A3

和 A4 处均表现为差异显著($P<0.05$)。随着距离树干水平距离的增加,根系分布逐渐减少。

2.4 不同土层根系密度参数的分布占比

通过分析 3 种退化程度小叶杨细根的根长密度和根表面积密度在不同土层中的分布占比可以得出,随退化程度加重,细根在表层的占比逐渐增加,在深层的占比逐渐减小(图 4)。未退化小叶杨细根在各土层中的根长密度之比为 $4:3:2:1:1$,中度退化的为 $9:8:5:2:1$,重度退化的为 $25:15:6:3:1$ 。在根表面积密度方面,未退化小叶杨细根在各土层中的比例为 $4:3:2:1:1$,中度退化的为 $6:5:3:1.5:1$,重度退化的为 $8:6:4:2:1$ 。随土层加深,3 种退化程度小叶杨的细根根长密度和根表面积密度均显著降低($P<0.05$)。其中重度退化的根长密度和根表面积密度降低幅度最大,S1 至 S2 土层细根降幅达 40% 和 24.72% 。未退化、中度退化、重度退化小叶杨细根在 S1 土层的根长分别占总根长的 36.32% , 35.32% , 49.22% ,根表面积分别占总根表面积的 34.17% , 35.54% , 38.43% ;在 S1、S2 土层的根长之和分别占总根长的 63.94% , 68.47% , 78.76% ,在 S1、S2 土层的根表面积之和分别占总根表面积的 62.59% , 66.31% , 67.36% ,其中重度退化小叶杨细根的根长密度占比和根表面积密度占比最大,中度退化的次之,未退化的最小。可以看出,总体上小叶杨的细根主要分布在 S1 和 S2 土层中,即土壤表层,退化程度越重,细根在土壤表层中所占比例越大。

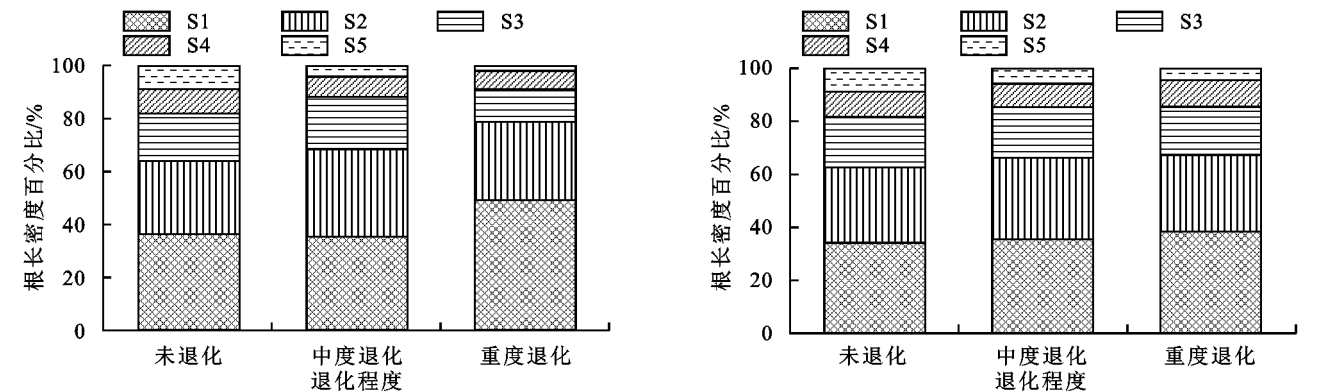


图 4 不同退化程度小叶杨细根不同土层根系密度参数的分布占比

3 讨论

在根系的功能上,细根决定着植物对土壤水分、养分的利用效果和潜力^[16]。细根的根长密度(RLD)在一定程度上能代表单位土体内的根系吸收表面积,RLD 越大,吸收表面积越大,越有应对不良环境的优势。已有研究^[17]表明,细根密度往往随土层加深而递减,本研究中,3 种退化程度小叶杨细根的根长密度、根表面积密度及根体积密度均随土层加深表现出较明显的下降趋势(图 2),与已有研究^[17]结果一致。

不同退化程度的小叶杨细根参数在水平方向上的变异性低于垂直方向。本研究中,未退化和中度退化小叶杨细根的根长密度和根表面积密度在水平方向上呈现出先增后减趋势。井家林^[18]在研究干旱地区的胡杨根系时发现,细根在水平方向上的分布呈现出先增后减趋势,与本已经结果一致。已有研究^[19]表明,植物根系的深浅决定植物主要利用土壤水源的不同。本研究发现,随退化程度加重,林地土壤含水率逐渐减小,并且未退化林地的平均土壤含水率显著高于重度退化的,中度

和重度退化林地的土壤含水率在垂直方向上整体偏低。安书超^[20]在科尔沁沙地退化防护林研究中也发现,退化沙棘林地的土壤含水率明显低于未退化林地的土壤含水率,与本研究结果相似。由于退化林地的土壤含水量低,根系分布浅的杨树出现不同程度的退化。本研究中,中度退化和重度退化小叶杨细根在0—60 cm土层的根长之和分别占0—100 cm土层总根长的88.16%,91.12%,而未退化的占比为81.96%,可以看出,小叶杨的细根主要分布在0—60 cm土层。董玉峰等^[21]对山东省杨树根系研究认为,根系生物量集中在0—60 cm土层,与本研究结果一致。由此可知,杨树细根在垂直方向上的分布深度都相对较浅,主要利用浅层土壤水分,因而易受到季节性干旱的影响而出现退化。此外,杨树细根分布较浅与自身的生物学特性有关,同时也受到土壤钙积层影响,钙积层主要分布在距地表30—50 cm左右的土层内,阻碍了杨树根系继续向下伸展,进而影响了根系对水分和养分的吸收。

同时本研究表明,在0—20 cm土层中,随着退化程度加重,细根占比不断增加。重度退化小叶杨的细根在0—20 cm土层的根长占比达到了49.22%,比未退化和中度退化的多了12.9%和13.9%,可以看出退化越严重,细根在表层分布越密集。本研究发现,3种退化程度小叶杨的细根在0—20 cm土层的生物量显著高于其他土层($P<0.05$),李盼盼^[22]研究也发现,杨树人工林的细根大部分位于0—20 cm的土层当中,燕辉等^[23]研究也得到了相似结果,即细根分布表层化,这也是因为表层土壤具有更好的水分和养分条件。孜尔蝶·巴合提等^[8]对退化小叶杨水分来源的研究表明,在整个生长季,中度退化和重度退化小叶杨主要利用0—40,0—80 cm土层的土壤水,也就是浅层土壤水。对于退化的小叶杨来说,吸收浅层土壤水分消耗的能量比深层土壤少,也可能是根系在深层的生长受到了过低含水量的限制。有研究^[24]表明,大部分树木根系分布于土壤表层是因为土壤表层聚集了大量的水分和养分,因而树木根系分布趋于土壤表层,这与本研究结果相似。同时,随着小叶杨退化程度加重,其对表层土壤水的依赖性就越强,因而细根更多分布在土壤表层。表层土壤水主要来自于天然降雨和降雪,由于气候变化或季节性干旱,有时候土壤表层含水量较低,无法满足树木正常的生长需求,导致植物组织脱水干燥^[25],进而造成树叶和枝条枯萎,发生不同程度的退化。

林木的根系分布实际上要比本文研究范围更大,尤其是在地下水位较深的区域。根区的不完全观测,可能会导致细根垂直分布格局发生一些失真。因此未来需要向更大范围挖掘根系和研究其垂直分布格局。此外,造成不同退化程度小叶杨细根的空间分布

差异的原因还有待深入研究,从而为张北地区防护林的管护和林分结构优化提供更全面的数据支撑。

4 结论

(1)随着林地土壤含水率逐渐减小,小叶杨退化程度加重,细根在表层的占比逐渐增加,在深层中的占比逐渐减小。

(2)在垂直方向上,3种退化程度小叶杨的细根生物量在S1土层显著高于其他土层,并随土层加深而出现细根的根长密度、根表面积密度、根体积极度的较明显下降趋势。在每个土层中,细根的根表面积密度和根体积极度均表现为未退化>中度退化>重度退化。

(3)在离开树干的水平方向上,未退化和中度退化小叶杨细根的根长密度呈现出先增加后减小的趋势,而重度退化在S1、S2、S3处相差不大,在S4处显著增加并达到最大。细根的根表面积密度和根体积极度在4个水平距离上均表现为未退化>中度退化>重度退化,未退化小叶杨细根的生物量均为最大。

参考文献:

- [1] 郑春雅,许中旗,马长明,等.冀西北坝上地区退化防护林的土壤性质[J].水土保持学报,2016,30(1):203-207.
- [2] 邢海富.坝上杨树防护林死亡原因浅析[J].河北林业科技,2015(1):76-77.
- [3] 苗博,孟平,张劲松,等.基于稳定同位素和热扩散技术的张北杨树水分关系差异[J].应用生态学报,2017,28(7):2111-2118.
- [4] 张欢,曹俊,王化冰,等.张北地区退化杨树防护林的水分利用特征[J].应用生态学报,2018,29(5):1381-1388.
- [5] Qiu S, Xu M, Li R Q, et al. Climatic information improves statistical individual-tree mortality models for three key species of Sichuan Province, China[J]. Annals of Forest Science, 2015, 72(4):443-455.
- [6] Toledo J, Magnusson W E, Castilho C V, et al. How much variation in tree mortality is predicted by soil and topography in Central Amazonia[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(3):331-338.
- [7] 韦景树,李宗善,冯晓珂,等.黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J].应用生态学报,2018,29(7):2433-2444.
- [8] 孜尔蝶·巴合提,贾国栋,余新晓,等.基于稳定同位素分析不同退化程度小叶杨水分来源[J].应用生态学报,2020,31(6):1807-1816.
- [9] 郑春雅,许中旗,马长明,等.冀西北坝上地区杨树防护林退化的影响因素[J].林业资源管理,2018(1):9-15,147.
- [10] Barigah T S, Charrier O, Douris M, et al. Water stress-induced xylem hydraulic failure is a causal factor of tree mortality in beech and poplar[J]. Annals of Botany, 2013, 112(7):1431-1437.
- [11] 李晓航,刘晓龙.干旱导致防护林衰退死亡研究进展

- [J].防护林科技,2016(12):59-60.
- [12] 孙守家,李春友,何春霞,等.基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析[J].应用生态学报,2017,28(7):2119-2127.
- [13] Jackson M B, Ricard B. Physiology, biochemistry and molecular biology of plant root systems subjected to flooding of the soil[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2003,168:193-213.
- [14] 邸楠.毛白杨根系性状时空变异及土壤水分吸收利用特征与机制[D].北京:北京林业大学,2019.
- [15] 史凯航.“三北”防护林退化及指标分析[J].辽宁林业科技,2015(5):57-59.
- [16] 赵佳宁,梁韵,柳莹,等.森林生态系统细根周转规律及影响因素[J].植物学报,2020,55(3):308-317.
- [17] Claus A, George E. Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three european forest chronosequences[J].NRC Research Press Ottawa, Canada,2005,35(7):1617-1625.
- [18] 井家林.极端干旱区绿洲胡杨根系空间分布特征及其构型研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [19] Liu Y H, Xu Z, Duffy R, et al. Analyzing relationships among water uptake patterns, rootlet biomass distribution and soil water content profile in a subalpine shrubland using water isotopes[J].European Journal of Soil Biology,2011,47:380-386.
- [20] 安书超.建平县防护林退化成因及对策[J].防护林科技,2016(2):80,84.
- [21] 董玉峰,姜岳忠,王卫东,等.大汶河流域杨树根系的生物量组成和空间分布[J].中国水土保持科学,2014,12(5):30-35.
- [22] 李盼盼.杨树人工林细根的空间分布特征及其季节动态[D].山东 泰安:山东农业大学,2012.
- [23] 燕辉,苏印泉,朱昱燕,等.秦岭北坡杨树人工林细根分布与土壤特性的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(2):85-89.
- [24] 张治军,王彦辉,于澎涛,等.不同优势度马尾松的生物量及根系分布特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2008,51(4):71-75.
- [25] 代永欣,王林,万贤崇.干旱导致树木死亡机制研究进展[J].生态学杂志,2015,34(11):3228-3236.

(上接第 241 页)

- [8] 邓磊,关晋宏,张文辉.辽东栎幼苗根系形态特征对环境梯度的响应[J].生态学报,2018,38(16):5739-5749.
- [9] 单立山,李毅,任伟,等.河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征[J].应用生态学报,2013,24(1):25-31.
- [10] 井家林.极端干旱区绿洲胡杨根系空间分布特征及其构型研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [11] 赵成义,施枫芝,盛钰,等.近 30 年阿克苏绿洲水面蒸发趋势及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(1):237-240.
- [12] Gale M R, Grigal D F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status[J].Canadian Journal of Forest Research,1987,17(8):829-834.
- [13] Fitter A H. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems[J].New Phytologist,1987,106:61-77.
- [14] Fitter A H, Stickland T R. Architectural analysis of plant root systems: III. Studies on plants under field conditions[J].New Phytologist,1992,121(2):243-248.
- [15] Bouma T J, Nielsen K L, Van Hal J, et al. Root system topology and diameter distribution of species from habitats differing in inundation frequency[J].Functional Ecology,2001,15(3):360-369.
- [16] Oppelt A L, Kurth W, Godbold D L. Topology, scaling relations and Leonardo's rule in root systems from African tree species[J].Tree Physiology,2001,21(2/3):117-128.
- [17] 白雪,赵成章,康满萍.疏勒河中游河岸林地地下水埋深对胡杨幼苗生物量分配与生长的影响[J].生态学杂志,2020,39(11):3605-3612.
- [18] 彭刚.基于稳定同位素的胡杨幼苗水分利用策略初探[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [19] 曾凡江,郭海峰,刘波,等.多枝怪柳和疏叶骆驼刺幼苗生物量分配及根系分布特征[J].干旱区地理,2010,33(1):59-64.
- [20] 马雄忠,王新平.阿拉善高原 2 种荒漠植物根系构型及生态适应性特征[J].生态学报,2020,40(17):6001-6008.
- [21] 贾立华,赵长星,王月福,等.不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响[J].植物生态学报,2013,37(7):684-690.
- [22] 鲍雅静,曹明,李政海,等.羊草与大针茅根系构型对水分梯度响应的比较研究[J].生态学报,2019,39(3):1063-1070.
- [23] 赵菊花,汪正祥,雷耘,等.长柄水青冈幼苗根系构型及动态变化[J].武汉植物学研究,2010,28(6):718-724.
- [24] 叶子奇.干旱区河漫滩胡杨根系生长与形态适应对策研究[D].北京:北京林业大学,2018.
- [25] 杨小林,张希明,李义玲,等.塔克拉玛干沙漠腹地 3 种植物根系构型及其生境适应策略[J].植物生态学报,2008,32(6):1268-1276.
- [26] 郭京衡,曾凡江,李芸君,等.塔克拉玛干沙漠南缘 3 种防护林植物根系构型及其生态适应策略[J].植物生态学报,2014,38(1):36-44.