灌溉方式对杨树人工林细根分布特征的影响

秘洪雷[1], 秦杏宇[2], 兰再平[2], 彭晶晶[2], 马 鑫[2]

(1.天津泰达盐碱地绿化研究中心有限公司, 天津 300457; 2.中国林业科学研究院, 北京 100091)

摘 要: [目的] 探究滴灌对北京市大兴区林场 5—6 年生欧美 107 杨树人工林细根分布的影响,为干旱沙地条件下营建人工林提供理论支持。[方法] 采用根钻取样法,对比滴灌和常规灌溉条件下细根生物量在不同方向、不同水平距离和不同土层深度的差异。[结果] 滴灌没有改变细根的空间分布格局,细根在水平方向的距树干 50 cm 内,垂直方向的 0—40 cm 土层集中分布,不同方向的细根分布表现为:株间>对角>行间。滴灌对细根生长和分布的影响受滴灌后形成的湿润带范围影响,株间方向细根生物量在水平和垂直方向的分布特征与对角和行间方向差异明显,湿润带范围内细根生物量均与常规灌溉差异极显著($p<0.01$)。[结论] 滴灌条件下的杨树人工林较常规灌溉有更多的细根分布,可以更充分利用地下资源,促进林木生长,提高林地生产力。

关键词: 滴灌; 杨树人工林; 细根; 生物量分布特征

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2021)05-0023-07 **中图分类号**: S725.7, S275.5

文献参数: 秘洪雷, 秦杏宇, 兰再平, 等.灌溉方式对杨树人工林细根分布特征的影响[J].水土保持通报, 2021,41(5):23-29.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.004; Bi Honglei, Qin Xingyu, Lan Zaiping, et al. Effects of irrigation methods on fine root distribution of poplar plantations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(5):23-29.

Effects of Irrigation Methods on Fine Root Distribution of Poplar Plantations

Bi Honglei[1], Qin Xingyu[2], Lan Zaiping[2], Peng Jingjing[2], Ma Xin[2]

(1.*Tianjin TEDA Saline Green Research Center Co., Ltd.*, *Tianjin* 300457, *China*; 2.*Chinese Academy of Forestry*, *Beijing* 100091, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of drip irrigation on the distribution of fine roots of five and six years old "107" poplar clones (*Populus* × *euramericana* "Neva") in Daxing District forest farm in Beijing City was investigated in order to provide theoretical support for plantation construction under arid sandy land conditions. [Methods] Differences in fine root biomass in different directions, different horizontal distances, and different soil depths due to drip irrigation compared with conventional irrigation were determined from root samples collected by drilling. [Results] The spatial distribution pattern of fine roots was not changed by drip irrigation. Within 50 cm from the trunk (in the horizontal direction), and within the 0—40 cm soil layer (in the vertical direction), fine roots were distributed intensively. In different directions, fine roots were distributed in the following order: between plants > diagonal direction > between rows. Growth and distribution of fine roots were mainly affected by the range of the wetting zone of drip irrigation. The distribution of fine root biomass in the inter-plant direction was significantly different from the diagonal direction and the inter-row direction. The biomass of fine roots under drip irrigation was significantly different from the biomass under conventional irrigation ($p<0.01$). [Conclusion] There were more fine roots in poplar plantations under drip irrigation than under conventional irrigation. The increased number of fine roots can make full use of underground resources, promote the growth of trees, and improve forest land productivity.

Keywords: **drip irrigation; poplar plantation; fine root; biomass distribution characteristics**

收稿日期:2021-04-16 **修回日期**:2021-06-09

资助项目:国家重点研发计划课题"欧美杨工业资源材高效培育技术研究"(2016YFD0600401)

第一作者:秘洪雷(1990—),男(汉族),山东省滨州市人,硕士研究生,主要从事植物抗逆生理研究。Email:bihonglei1990@126.com。

通讯作者:兰再平(1960—),男(汉族),内蒙古包头市人,硕士,研究员,主要从事森林生态研究。Email:wbOffice@caf.ac.cn。

杨树是中国长江流域及黄淮海地区最重要的速生丰产林造林树种，造林面积居世界首位，但由于部分杨树人工林经营管理粗放，生产力较低，木材产量和质量不高[1]。良好的水肥管理是提高林地生产力的重要条件，滴灌是根据作物需水规律进行局部灌溉的一种高效、经济的节水灌溉技术，在国外的杨树人工林培育方面有了较广泛的应用[2-3]，国内关于滴灌营建人工林的研究也在一直在进行[4-5]，滴灌能明显促进植物生长[6]，提高林地生产力[7]。

根系是植物吸收水分和养分的主要器官，其分布和形态直接反应植物对土壤资源的利用状况，对林木生长具有决定作用。通常认为直径小于 2 mm 的根具有相同的生理功能，将其作为细根来研究[8]。细根是植物根系的重要组成部分，虽然仅占林木根系总生物量不足 30%的比例，但由于周转迅速，细根的生长和维持要消耗超过 40%的森林初级净生产力(net NPP)，对森林生态系统的物质交换、能量流动以及土壤结构改善等方面有重要意义[9-10]。细根的形态特征和空间分布影响植物对土壤水分和养分的竞争能力，反映植物间地下竞争和林木地下资源利用程度[11-13]，直接影响林木地上部分的生长和生态效益的发挥[14-15]。以往多采用距树干特定距离或随机取样的方法研究细根的分布特征，对滴灌条件下细根整体分布的研究较少。本研究以滴灌栽培的杨树人工林为研究对象，以常规灌溉栽培条件下的细根分布作为对比，研究细根的空间分布特征，分析细根生物量与林地生产力的关系，为滴灌条件下杨树人工林的合理经营提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于北京市大兴区林场，属暖温带半湿润大陆性季风气候。年均气温 11.6 ℃，1 月平均气温－2.3 ℃，7 月平均气温 25.1 ℃，年平均无霜期 180～200 d，年平均降水量 520～560 mm。土壤为永定河故道冲击沙土，地下水位 36 m，土壤容重为 1.46±0.15 g/cm^3，田间持水量为 10%±1.2%，蓄水能力差，土壤从地表向下 1.2 m 均无明显腐殖质层，有机质含量低。

1.2 试验材料

试验分别以滴灌栽培(DI)和常规灌溉栽培(CI)的欧美杨 107(*Populus*×*euramericana* “Neva”)人工林作为研究对象。该林分于 2011 年春季采用 30 cm长的插条扦插造林，株行距 3 m×5 m，滴灌栽培的试验林滴灌管沿株间铺设，滴头流量 4 L/h，滴头间距为 60 cm。结合土壤湿度传感器，于每年的 5—9 月，当 20 cm 土层土壤相对含水量为 60%时进行灌溉，灌溉量由灌溉时长控制，每次灌溉量为 9 mm，停灌后能在树行方向形成宽度为 1.0～1.2 m，深度为 60—70 cm 的连续湿润带[16]，灌溉总量约为 250 mm。常规灌溉的试验林采用沟灌的灌溉方式，灌溉量由流量计控制，每次灌溉量为 50 mm，灌溉总量为 250 mm，其中春季、秋季各灌溉 1 次，夏季 3 次。滴灌和常规灌溉栽培的人工林均不进行修剪和施肥处理，中耕除草、虫害防治等养护措施按照林场的植物保护要求统一进行。

1.3 试验设计

分别在滴灌和常规灌溉的林分内设置面积为 20 m×90 m 的标准地，对标准地内的样木进行每木检尺，然后根据标准地内样木的平均值各自选取 3 株标准木作为研究对象(表 1)。于 2016 年 10 月下旬用根钻法进行取样，根钻内径 10 cm，高 10 cm。根据 1/4 样圆法[17]，以样木树干为中心，分别选取株间、行间和对角 3 个方向作为取样区，然后在距树干 20，50，100 cm 和 150 cm 处钻取土芯，取样深度为 60 cm，每 10 cm 为一个土层。取样方向和取样点位见图 1。把每层的土样分别装入标号的塑封袋，把取好的共计 432 个土样带回实验室分析。于 2017 年 10 月下旬分别在滴灌和常规灌溉的林分内选取标准木，取样测定细根生物量。

表 1 杨树人工林标准木基本特征

样木编号		滴灌				常规灌溉			
		胸径/cm	树高/m	冠幅/m	单株材积/m^3	胸径/cm	树高/m	冠幅/m	单株材积/m^3
5年生	1	15.6	17.26	3.63×3.42	0.126 0	13.4	15.24	3.12×2.57	0.083 7
	2	15.8	16.87	3.13×3.50	0.126 8	13.6	15.86	3.03×2.61	0.089 2
	3	15.8	17.63	3.35×3.17	0.131 6	13.4	15.47	3.07×2.70	0.084 8
	平均	15.7	17.25	3.37×3.36	0.128 1	13.5	15.52	3.07×2.63	0.085 9
6年生	1	16.8	18.03	3.52×3.66	0.151 7	13.9	16.22	3.36×2.72	0.094 9
	2	16.7	17.76	3.47×3.59	0.148 0	14.2	15.76	3.29×2.87	0.096 7
	3	16.8	18.17	3.62×3.32	0.152 7	14.1	15.89	3.26×2.94	0.096 0
	平均	16.8	17.99	3.54×3.52	0.150 8	14.1	15.96	3.30×2.84	0.095 9

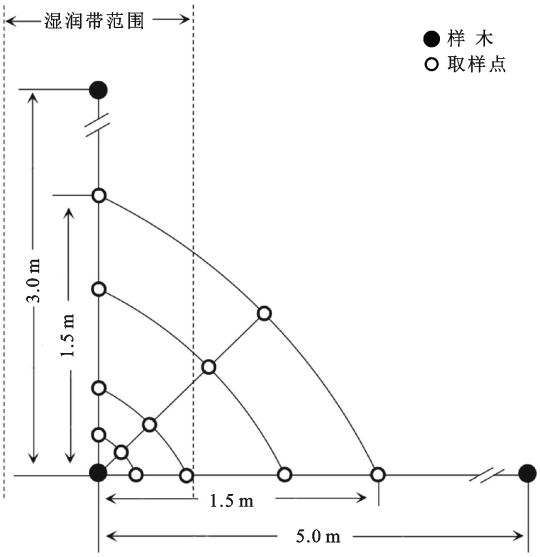


图 1　杨树人工林根系取样点位置及取样方向示意图

1.4　指标测定与处理

土样在清水中浸泡后用流水冲洗过孔径为 0.8 mm筛,使根系与土样中绝大部分的土壤及其他杂质分离,然后在清水中使用镊子小心捡取所有活根系依次扫描。本研究按照传统的根系分类标准[18],以直径≤2 mm 作为划分细根和粗根的阈值,依次将细根放入编号的信封中,然后放入 80 ℃烘箱中烘干至恒重(24 h),用电子天平称重(精确到 0.001 g)进行各根样生物量的计算。

分别计算不同取样方向在不同树干距离处不同土层深度的细根生物量密度,利用 Excel 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　滴灌对细根生物量分布的影响

2.1.1　*滴灌对细根生物量空间分布的影响*　为探究滴灌对不同方向细根分布的影响,以同一方向所有取样点细根生物量的平均值表征细根的分布特征。由表 2 可知,滴灌和常规灌溉栽培条件下,不同林龄的细根生物量密度均呈现:株间>对角>行间的分布特征,滴灌条件下的细根生物量密度均高于常规灌溉,且差异极显著,这说明滴灌对细根生长影响显著。5 年生杨树人工林,滴灌条件下株间方向细根的平均生物量密度为 0.336 mg/cm^3,分别是对角方向和行间方向的 2.07倍和 2.79 倍,不同方向间差异显著;常规灌溉条件下株间方向的细根生物量密度为 0.114 mg/cm^3,分别是对角和行间方向的 1.26 倍和 1.86 倍,与对角方向细根生物量密度差异不显著,与行间方向差异显著。6 年生杨树人工林,滴灌条件下株间方向的细根生物量密度为 1.712 mg/cm^3,分别是对角方向和行间方向的 2.89 倍和 5.16 倍,不同方向间差异显著;常规灌溉条件下株间方向的细根生物量密度为 0.425 mg/cm^3,分别是对角和行间方向的 1.15 倍和 1.63 倍,不同方向间差异显著。滴灌对细根分布影响显著,随林龄增加,滴灌条件下的细根分布呈沿株间方向集中分布的趋势,而常规灌溉条件下细根呈现不同方向相对均匀分布的特征,这说明滴灌条件下的细根受灌溉形成湿润带范围的影响,水分是影响细根分布的重要因素,本文以 5 年生杨树人工林为研究对象,进行不同灌溉方式对细根分布特征影响的分析。

表 2　杨树人工林不同方向细根生物量

细根生物量/(mg·cm^{-3})	5 年生杨树		6 年生杨树	
	DI	CI	DI	CI
株间方向	0.336±0.116**a	0.114±0.015a	1.712±0.080**a	0.425±0.024a
对角方向	0.163±0.007**b	0.091±0.014a	0.593±0.047**b	0.369±0.017b
行间方向	0.120±0.003**c	0.061±0.008b	0.331±0.015**c	0.260±0.030c

注:表中数据为平均值±标准误;**表示不同灌溉方式之间差异极显著($p<0.01$);不同字母表示同一灌溉条件下不同方向之间差异显著($p<0.05$)。

2.1.2　*滴灌对细根生物量水平分布的影响*　在株间方向,滴灌条件下细根生物量整体表现出随树干距离增大不断减小的分布特征(表 3),细根生物量密度在距树干 20 cm 或 50 cm 处最大,然后随树干距离增大显著减小。以 20—30 cm 土层为例,距树干 20 cm 处细根生物量密度最大,为 0.506 mg/cm^3,是距树干 50 cm处的 1.03 倍,差异不显著,是距树干 100 cm,150 cm 处的 2.11,2.46 倍,差异显著。常规灌溉条件下细根在不同土层均表现出随树干距离增大而减少的分布特征,细根生物量密度的最大值在距树干 20 cm或50 cm处,且与距树干 100,150 cm 处的细根生物量密度差异显著。以 20—30 cm 土层为例,距树干 50 cm 处细根生物量密度为 0.203 mg/cm^3,是距树干 20 cm 处的 1.03 倍,差异不显著,是距树干 100 cm和 150 cm 处的 2.11 倍和 4.24 倍,差异显著。滴灌对 0—40 cm 土层的细根生长影响显著,滴灌

条件下 0—40 cm 土层不同树干距离处的细根生物量密度均大于常规灌溉且差异极显著,40—60 cm 土层不同树干距离的细根生物量密度与常规灌溉差值减小,这可能是受滴灌形成湿润带范围和形状的影响,造成了土壤中水养含量的差异,影响了细根生长和分布。

在对角方向,滴灌条件下不同土层的细根生物量密度均在距树干 20 cm 处最大,然后随树干距离增大而减小且差异显著(表 3)。以 20—30 cm 土层为例,距树干 20 cm 处的生物量密度为 0.359 mg/cm^3,分别是距树干 50,100,150 cm 处的 1.96,3.49,7.41 倍,均表现出显著差异。常规灌溉条件下不同土层细根生物量的水平分布特征与滴灌相同,细根生物量密度在距树干 20 cm 处最大,然后随树干距离增大不断减少,这说明滴灌没有改变细根在对角方向的分布格局。0—10 cm 土层不同树干距离处的生物量密度均表现为滴灌显著大于常规灌溉;在 10—20 cm 土层,滴灌与常规灌溉条件下细根生物量密度的差值随树干距离增大不断减小,在距树干150 cm处差异不显著;在 20—60 cm 土层,滴灌条件下的生物量密度在距树干 20 cm 高于常规灌溉且差异显著,而在距树干 150 cm 处均低于常规灌溉,这说明不同灌溉方式影响了细根的分布特征,滴灌栽培条件下的细根在湿润带范围内集中分布,在湿润带以外的土壤细根分布较少,而常规灌溉条件下细根分布分布范围较广,其分布按照随树干距离增大不断减少的特征规律分布。

表 3 不同灌溉方式下杨树人工林细根生物量分布特征

方向	土层/cm	不同土层细根生物量/(mg·cm^{-3})							
		20 cm 土层		50 cm 土层		100 cm 土层		150 cm 土层	
		DI	CI	DI	CI	DI	CI	DI	CI
株间方向	0—10	0.575±0.072**^{Aab}	0.087±0.012^{Ca}	0.640±0.097**^{Aa}	0.106±0.007^{Ba}	0.402±0.052**^{Ab}	0.086±0.011^{ABCa}	0.411±0.073**^{Ab}	0.034±0.005^{Bb}
	10—20	0.614±0.069**^{Aa}	0.215±0.023^{Aa}	0.612±0.077**^{ABa}	0.172±0.017^{Aa}	0.375±0.049**^{Ab}	0.112±0.010^{Ab}	0.343±0.035**^{Ab}	0.059±0.011^{Ac}
	20—30	0.506±0.051**^{Aa}	0.196±0.039^{Aa}	0.494±0.066**^{Ba}	0.203±0.037^{Aa}	0.240±0.034**^{Bb}	0.096±0.006^{Ab}	0.206±0.028**^{Bb}	0.048±0.009^{ABb}
	30—40	0.528±0.049**^{Aa}	0.181±0.020^{ABa}	0.552±0.013**^{ABa}	0.172±0.019^{Aa}	0.232±0.032**^{Bb}	0.083±0.019^{BCb}	0.103±0.005**^{Cc}	0.052±0.008^{ABb}
	40—50	0.197±0.009^{Ba}	0.182±0.011^{ABa}	0.232±0.042^{Ca}	0.173±0.027^{Aa}	0.223±0.034**^{Ba}	0.069±0.012^{BCb}	0.061±0.008^{Cb}	0.054±0.014^{ABb}
	50—60	0.126±0.017^{Bb}	0.139±0.020^{Ba}	0.203±0.031*^{Ca}	0.102±0.015^{Bb}	0.135±0.010**^{Cb}	0.066±0.006^{Cc}	0.047±0.007^{Cc}	0.052±0.012^{ABc}
对角方向	0—10	0.345±0.072**^{ABa}	0.073±0.008^{Da}	0.138±0.017**^{Cb}	0.066±0.006^{Ba}	0.112±0.025*^{Bb}	0.042±0.006^{CDb}	0.072±0.003**^{Bb}	0.031±0.004^{Bb}
	10—20	0.413±0.033**^{Aa}	0.165±0.022^{ABa}	0.288±0.043**^{Ab}	0.111±0.011^{ABb}	0.173±0.020**^{Ac}	0.092±0.006^{Abc}	0.087±0.006^{Ad}	0.071±0.014^{Ac}
	20—30	0.359±0.058*^{ABa}	0.178±0.037^{Aa}	0.183±0.028^{BCb}	0.152±0.032^{Aab}	0.103±0.015^{BCc}	0.095±0.015^{Abc}	0.048±0.008^{Cc}	0.058±0.009^{Ad}
	30—40	0.331±0.049*^{ABa}	0.192±0.019^{Aa}	0.208±0.016^{Bb}	0.144±0.030^{Ab}	0.072±0.008^{Cc}	0.076±0.012^{ABc}	0.020±0.001^{Dc}	0.031±0.005^{Bd}
	40—50	0.289±0.041**^{Ba}	0.129±0.020^{BCa}	0.176±0.025*^{BCb}	0.121±0.008^{Aa}	0.031±0.002^{Dc}	0.062±0.008**^{BCb}	0.007±0.001^{Ec}	0.012±0.003^{Cc}
	50—60	0.279±0.033**^{Ba}	0.096±0.006^{CDa}	0.153±0.016^{BCb}	0.140±0.021^{Ab}	0.017±0.003^{Dc}	0.034±0.008^{Dc}	0.002±0.000**^{Ec}	0.011±0.001^{Cc}
行间方向	0—10	0.239±0.024**^{BCa}	0.083±0.005^{Ca}	0.130±0.008**^{ABb}	0.075±0.007^{Ba}	0.059±0.010*^{BCc}	0.037±0.008^{Bb}	0.034±0.007*^{Bc}	0.018±0.003^{Dc}
	10—20	0.504±0.060**^{Aa}	0.135±0.011^{Aa}	0.138±0.024^{Ab}	0.120±0.006^{Aa}	0.139±0.010**^{Ab}	0.075±0.004^{Ab}	0.052±0.011^{Ac}	0.043±0.006^{Ac}
	20—30	0.301±0.021**^{Ba}	0.125±0.024^{ABa}	0.102±0.016^{ABb}	0.111±0.010^{Aa}	0.074±0.004^{Bb}	0.061±0.011^{Ab}	0.040±0.002^{ABc}	0.033±0.007^{Ab}
	30—40	0.272±0.050*^{Ba}	0.122±0.023^{ABa}	0.105±0.010*^{ABb}	0.069±0.007^{Bb}	0.057±0.009^{Cbc}	0.040±0.006^{Bbc}	0.020±0.004^{Cc}	0.032±0.006^{Ac}
	40—50	0.228±0.033**^{BCa}	0.094±0.012^{BCa}	0.105±0.018**^{ABb}	0.040±0.006^{Cb}	0.013±0.003^{Dc}	0.028±0.007^{BCb}	0.006±0.001^{Dc}	0.008±0.002^{BCc}
	50—60	0.161±0.023**^{Ca}	0.071±0.009^{Ca}	0.095±0.016**^{Bb}	0.024±0.005^{Db}	0.008±0.001^{Dc}	0.018±0.004*^{Cbc}	0.002±0.000^{Dc}	0.006±0.001**^{Cc}

注:表中数据为平均值±标准误;* 表示不同灌溉方式之间差异显著($p<0.05$);** 表示不同灌溉方式之间差异极显著($p<0.01$);同列不同大写字母表示同一灌溉条件下不同土层之间差异显著($p<0.05$);同行同一灌溉条件下的不同小写字母表示不同水平距离之间差异显著($p<0.05$)。DI 为滴灌栽培;CI 为常规栽培。下同。

行间方向细根不同土层的水平分布特征与对角方向相似(表 3)。滴灌条件下不同土层的细根生物量密度均在距树干 20 cm 处最大,然后随树干距离增大而减小且差异显著。以 20—30 cm 土层为例,距树干 20 cm 处的细根生物量密度为 0.301 mg/cm^3,分别是距树干 50,100,150 cm 处的 2.95,4.06,7.47 倍,均表现出显著差异。常规灌溉条件下不同土层的细根生物量密度均在距树干 20 cm 处最大,然后距树干水平距离的增大而减小,其中 0—30 cm 土层距树干 20 cm 处的细根生物量密度分别是距树干 50 cm 处的 1.11,1.18,1.13 倍,差异不显著,30—60 cm 土层距树干 20 cm处的细根生物量密度分别是距树干 50 cm 处的 1.76,2.35,3.02 倍,差异显著。0—10 cm 土层的生物量密度均表现为滴灌显著大于常规灌溉,10—60 cm 土层在距树干 20 cm 处滴灌和常规灌溉条件下的细根生物量密度差值最大且差异显著,随树干距离增大差值呈减小趋势,尤其在 50—60 cm 土层距树干 100 cm和 150 cm 处的细根生物量密度表现为常规灌溉显著大于滴灌。这说明滴灌栽培条件下的细根分布受滴灌形成湿润带影响显著,湿润带范围内细根生物量均显著高于常规灌溉,滴灌能显著促进细根的生长,影响细根水平分布。

2.1.3　滴灌对细根生物量垂直分布的影响　株间方向滴灌条件下细根的垂直分布呈现随土层加深不断减少的分布特征(表 3),不同树干距离处细根生物量密度的最大值在 0—20 cm 土层,土层之间细根生物量差异不显著。常规灌溉条件下不同树干距离处细根生物量密度的最大值在 10—30 cm 土层,显著高于 0—10 cm 土层,细根的垂直分布整体呈现先增加后减少的分布特征。以距树干 20 cm 处为例,滴灌条件下细根生物量密度在 10—20 cm 土层最大,为 0.614 mg/cm^3,是 0—10 cm 土层的 1.07 倍,差异不显著,分别是 20—30,30—40,40—50,50—60 cm 土层的 1.21,1.16,3.12,4.87 倍,随土层加深细根分布呈减少趋势,且与 40—50 cm 和 50—60 cm 土层细根生物量密度差异显著。常规灌溉条件下细根生物量密度的最大值也在 10—20 cm 土层,为 0.215 mg/cm^3,是 0—10 cm 土层的 2.47 倍,差异显著,分别是 20—30,30—40,40—50,50—60 cm 土层的 1.10,1.19,1.18,1.55 倍,随土层加深细根分布呈减少趋势,且与 50—60 cm 土层细根生物量密度差异显著。滴灌对株间方向细根的垂直分布影响显著,极大地提高了表土层的细根分布。

对角方向滴灌条件下细根的垂直分布与株间方向不同,不同树干距离处细根生物量密度的最大值在 10—20 cm土层,细根在垂直方向呈现先增加后减少的分布特征(表 3)。常规灌溉条件下细根仍呈现先增加后减少的垂直分布特征,0—10 cm 土层的细根生物量显著低于其他土层。以距树干 100 cm 处为例,滴灌条件下细根生物量密度在 10—20 cm 土层最大,为0.173 mg/cm^3,是 0—10 cm 土层的 1.54 倍,差异显著,分别是 20—30,30—40,40—50,50—60 cm 土层的 1.68,2.40,5.58,10.18 倍,均有显著差异。常规灌溉条件下细根生物量密度在 20—30 cm 土层最大,为0.095 mg/cm^3,是 0—10 cm 土层的 2.26 倍,差异显著,分别是 40—50 cm 和 50—60 cm 土层的 1.53 倍和 2.79 倍,差异显著。滴灌条件下对角方向细根的垂直分布特征与常规灌溉相似,但在距树干 20 cm 处,0—40 cm各土层之间细根分布差值较小,均极显著高于常规灌溉,这可能是受滴灌后形成的湿润带影响,促进了细根的生长。

行间方向滴灌条件下细根的垂直分布特征与对角方向相似(表 3),不同树干距离处细根生物量密度均在 10—20 cm 土层最大,细根在垂直方向呈先增后减的分布特征。常规灌溉条件下细根在不同树干距离处也呈先增后减的垂直分布特征,细根生物量密度在 10—20 cm 土层最大,且显著高于 0—10 cm 土层,然后随土层加深不断减小。以距树干 100 cm 处为例,滴灌条件下细根生物量密度的最大值在 10—20 cm 土层,为0.139 mg/cm^3,是 0—10 cm 土层的 2.36 倍,差异显著,分别是 20—30,30—40,40—50,50—60 cm 土层的 1.88,2.44,10.69,17.38 倍,均有显著差异,不同土层之间细根分布差值较大。常规灌溉条件下细根生物量密度在 10—20 cm 土层最大,为 0.075 mg/cm^3,是 0—10 cm 土层的 2.03 倍,差异显著,分别是 30—40,40—50,50—60 cm 土层的 1.88,2.68,4.17 倍,均差异显著,不同土层之间细根分布差值较小。

2.2　取样方向、水平距离、土层深度及其交互作用对细根生物量的影响

对滴灌和常规灌溉条件下细根生物量与取样方向、树干距离、土层深度变化进行综合分析(表 4)。由表 4 可知,滴灌和常规灌溉栽培条件下的杨树人工林细根生物量均受取样方向、树干距离、土层深度及其交互作用等因素影响,且影响显著,这说明杨树人工林细根的空间分布受到多种因素影响。滴灌条件下细根在不同取样方向表现出不同的水平和垂直分布特征,细根的生物量受取样方向等因素的影响大于常规灌溉对其的影响,表明滴灌条件下的细根分布有更明显的空间异质性,这可能是受滴灌带铺设及滴灌后形成的湿润带范围造成的空间位置间土壤水分条件不同的结果。

表 4　取样方向、树干距离、土层深度及其交互作用对细根生物量的影响

变异来源	自由度	滴　灌		常规灌溉	
		F	p	F	p
取样方向	2	542.375	<0.001*	152.7	<0.001*
树干距离	3	428.762	<0.001*	347.233	<0.001*
土层深度	5	129.295	<0.001*	60.73	<0.001*
取样方向×水平距离	6	24.518	<0.001*	7.984	<0.001*
取样方向×土层深度	10	34.476	<0.001*	4.252	<0.001*
水平距离×土层深度	15	5.977	<0.001*	5.332	<0.001*
取样方向×水平距离×土层深度	30	4.443	<0.001*	3.081	<0.001*

注:* 表示影响显著(p<0.05)。

3 讨 论

滴灌条件下不同方向的细根生物量差异显著，且随林龄增加呈沿株间方向集中分布的趋势，而常规灌溉条件下细根在不同方向的分布相对均匀。滴灌显著影响杨树人工林细根的空间分布，这可能是由于滴灌后形成的湿润带造成了不同方向土壤水分条件的差异，影响了细根的生长。

滴灌条件下株间方向的不同水平距离以及对角和行间方向距树干 20 cm 处的细根生物量均与常规灌溉差异极显著，这与滴灌后形成的长半椭球体状土壤湿润带[5]的分布范围一致，这说明在河流故道细沙壤土上，土壤水分含量是影响细根生物量的重要因素，这与耿东梅等[19]水分胁迫显著影响细根形态特征的研究结果一致。

滴灌影响不同树干距离处的细根分布，尤其对铺设滴灌带的株间方向影响显著，但没有改变其水平分布特征，细根在水平方向呈现随树干距离增大不断减少的分布规律，这与陈光水等[20]对树木位置对细根生物量影响的研究结果一致。滴灌条件下株间方向细根生物量的水平差异较小，不同树干距离处均有大量细根分布，对角和行间方向距树干 20 cm 处的细根生物量显著高于其他水平距离，细根呈现与湿润带方向一致的带状分布，而常规灌溉条件下，细根随水平距离增大规律减少，不同树干距离处的细根生物量差值较小，这说明滴灌带的铺设方向影响细根的生长和分布。

不同灌溉条件下杨树人工林的细根均主要分布在 0—40 cm 土层，滴灌没有改变细根在垂直方向的分布范围，这与闫小莉等[21]，朱秋美等[22]对细根垂直分布特征研究的结果一致，细根的垂直分布受林木本身遗传特性的调控[23]。滴灌条件下株间方向的细根生物量随土层深度增加不断减少，这和闫小莉等[21]关于滴灌条件下细根在不同土层分布的研究结果一致，而常规灌溉条件下，细根生物量在 10—20 cm 土层最大，显著高于 0—10 cm 土层，然后随土层加深不断减少。对角和行间方向细根在均 10—20 cm 土层分布最多，这是由于对角和行间方向受湿润带影响有限，而立地土壤为蓄水能力差的沙土，灌溉后水分下渗，加上表土层与大气接触，温度较高，蒸发量大，使0—10 cm土层的土壤环境较差，不利于细根的生长和周转。

细根生长受土壤资源（如水分、温度和养分等）有效性的影响[24]，土壤资源有效性的增加促进细根生长和生物量的积累[25-26]，提高对土壤中水分和养分的吸收能力。滴灌栽培杨树人工林较常规灌溉有更多的细根分布，是由于滴灌条件下湿润带范围内水分含量持续充足的土壤状态改变了土壤的水分、温度等条件，适宜的土温和水分也有助于林地内枯枝落叶的分解，从而改善河流故道细沙立地的土壤条件，提高土壤资源有效性，促进细根的生长和积累。5 年生杨树人工林滴灌条件下的平均单株材积为 0.128 1 m^3，是常规灌溉的 1.49 倍，6 年生杨树人工林滴灌条件下的单株材积为 0.164 3 m^3，是常规灌溉的 1.57 倍，滴灌营建杨树人工林的林木蓄积量分别比常规灌溉高 28.17 m^3/hm^2 和 36.59 m^3/hm^2，随林龄增加，滴灌条件下杨树人工林的林地生产力明显提高，这说明与常规灌溉相比，滴灌条件下更多的细根分布可以更充分的利用地下资源，促进林木生长，提高林地生产力。

4 结 论

杨树人工林的细根分布存在明显的空间格局，不同灌溉条件下细根生物量的分布表现为：株间＞对角＞行间。滴灌影响细根在水平方向的生长和积累，但没有改变其随树干距离增大而减少的水平分布特征。滴灌条件下细根在 0—40 cm 土层分布集中，株间方向的细根随土层深度增加不断减少，对角和行间方向细根在 10—20 cm 土层分布最多。本文以滴灌和常规灌溉栽培的 5 a 生杨树人工林为研究对象，通过探究杨树人工林细根的空间分布特征，揭示了滴灌对细根生物量影响和对提高林地生产力的促进作用，为滴灌条件下杨树人工林的合理经营和水分的高效利用提供理论依据。

[参 考 文 献]

[1] 方升佐，徐锡增，严相进，等.修枝强度和季节对杨树人工林生长的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版)，2000，24(6)：6-10.

[2] Dickmann D I, Nguyen P V, Pregitzer K S. Effects of irrigation and coppicing on above-ground growth, physiology, and fine-root dynamics of two field-grown hybrid poplar clones [J]. Forest Ecology and Management, 1996, 80(1/2/3): 163-174.

[3] O'Neill M K, Shock C C, Lombard K A, et al. Hybrid poplar (*Populus* ssp.) selections for arid and semi-arid intermountain regions of the Western United States [J]. Agroforestry Systems, 2010, 79(3): 409-418.

[4] 席本野，王烨，邸楠，等.地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响[J].生态学报，2012，32(17)：5318-5329.

[5] 傅建平，兰再平，孙尚伟，等.滴灌条件下杨树人工林土壤的水分运移[J].林业科学，2013，49(6)：25-29.

[6] 贺勇，兰再平，孙尚伟，等.地面滴灌对 107 杨幼林生长和

水肥利用的影响[J].东北林业大学学报,2015,43(11):37-41.

[7] 秦杏宇,吕馥龄,彭晶晶,等.滴灌与沟灌栽培杨树人工林土壤水分动态与生产力[J].应用生态学报,2020,31(5):1535-1542.

[8] Pregitzer K S, DeForest J L, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees [J]. Ecological Monographs, 2002,72(2):293-309.

[9] 张小全,吴可红.森林细根生产和周转研究[J].林业科学,2001,37(3):126-138.

[10] Tateno R, Hishi T, Takeda H. Above-and belowground biomass and net primary production in a cool-temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen [J]. Forest Ecology and Management, 2004,193(3):297-306.

[11] 钱文丽,卢元,王韶仲,等.混交对红松人工林细根生物量和空间分布的影响[J].东北林业大学学报,2016,44(2):1-5.

[12] 李凌浩,林鹏,邢雪荣.武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究[J].应用生态学报,1998,9:337-340.

[13] 尤健健,张文辉,邓磊,等.间伐对黄龙山油松中龄林细根空间分布和形态特征的影响[J].生态学报,2017,37(9):3065-3073.

[14] Gwenzi W, Veneklaas E J, Holmes K W, et al. Spatial analysis of fine root distribution on a recently constructed ecosystem in a water-limited environment [J]. Plant and Soil, 2011,348(1/2):471-489.

[15] 谢玲芝,李俊楠,王韶仲,等.林分密度对水曲柳人工林吸收根生物量和根长密度的影响[J].东北林业大学学报,2014,42(9):1-5.

[16] 傅建平,兰再平,孙尚伟,等.滴灌条件下杨树人工林土壤的水分运移[J].林业科学,2013,49(6):25-29.

[17] 赵忠,李鹏,王乃江.渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究[J].应用生态学报,2000(1):37-39.

[18] Block R M A, Rees K C J, Knight J D.A review of fine root dynamics in populus plantations [J]. Agroforestry Systems, 2006,67(1): 73-84.

[19] 耿东梅,单立山,李毅.土壤水分胁迫对红砂幼苗细根形态和功能特征的影响[J].水土保持通报,2014,34(6):36-42.

[20] 陈光水,杨玉盛,何宗明,等.树木位置和胸径对人工林细根水平分布的影响[J].生态学报,2005,25(5):1007-1011.

[21] 闫小莉,戴腾飞,贾黎明,等.欧美 108 杨细根形态及垂直分布对水氮耦合措施的响应[J].植物生态学报,2015,39(8):825-837.

[22] 朱美秋,马长明,翟明普,等.河北石质山区花椒细根分布特征[J].林业科学,2009,45(2):131-135.

[23] Burke M K, Raynal D J, Mrrchell M J. Soil nitrogen availability influences seasonal carbon allocation patterns in sugar maple(*Acer saccharum*) [J]. Canndian Journal of Forest Research, 1991,22(4):447-456.

[24] Domisch T, Finér L, Lehto T. Growth, carbohydrate and nutrient allocation of Scots pine seedlings after exposure to simulated low soil temperature in spring [J]. Plant and Soil, 2002,246(1):75-86.

[25] King J S, Albaugh T J, Allen H L, et al. Belowground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine [J]. New Phytologist,2002,154(2):389-398.

[26] 程云环,韩有志,王庆成,等.落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究[J].植物生态学报,2005,29(3):403-410.

(上接第 8 页)

[14] 李红梅.柴达木盆地气候变化对植被的影响分析[J].草业学报,2018,27(3):13-23.

[15] Ahmed M, Al-Dousari N, Al-Dousari A. The role of dominant perennial native plant species in controlling the mobile sand encroachment and fallen dust problem in Kuwait [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016,9(2):1-4.

[16] 赵振,陈惠娟,冯林传.青海德令哈主要环境地质问题及其防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(2):83-89.

[17] 汪生斌,祁泽学,苏世杰,等.基于数值模拟的格尔木地区地下水位致灾性抬升机理研究[J].干旱区研究,2020,37(5):1132-1139.

[18] 杨文君,田丽慧,张登山,等.绿色有机标准追求下柴达木盆地枸杞种植效益分析[J].干旱区资源与环境,2021,35(9):151-157.

[19] 雷玉红,蔡玉琴,梁志勇,等.格尔木地区气象条件对枸杞生育期出现早晚影响分析[J].青海农林科技,2019(3):22-26.

[20] 李冰.青海枸杞产业现状分析与趋势研究[J].林业经济,2013,35(4):60-64.

[21] 青海省水利厅.青海省水土保持公报[R].2019.