

# 不同配置农田防护林对田间土壤水分空间变异的影响

王 栋<sup>1</sup>, 肖辉杰<sup>1</sup>, 辛智鸣<sup>2</sup>, 贾宏涛<sup>3</sup>, 曹琪琪<sup>1</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站,  
内蒙古 磴口 015200;3.新疆农业大学草业与环境科学学院,乌鲁木齐 830052)

**摘要:**河套灌区是我国最大的引黄灌区,区内水资源匮乏,农田防护林系统在灌区土壤水分调控中发挥着重要作用。为明确防护林对农田土壤水分的影响,采用传统统计学方法综合分析了防护林网内土壤蒸发、风速、光照强度、气温、空气相对湿度、细根生物量密度及土壤容重等因素对土壤含水量的影响。结果表明:不同配置的农田防护林网内田间土壤水分具有明显的空间异质性,水平方向上土壤含水量与林带距离呈正向关系,主要影响因子为风速、土壤蒸发和  $1H$  ( $H$  为防护林树高)范围内的细根生物量密度;垂直方向上 0—80 cm 土壤水分从表层向下逐渐增加,主要影响因子为 20—80 cm 土层的细根生物量密度、土壤容重和表层土壤蒸发。不同配置农田防护林系统对田间土壤水分影响差异明显,2 行小美旱杨+2 行二白杨疏透度为 45% 的防护林的防护效益最好,田间土壤含水量最高。研究结果明确了不同配置防护林的农田土壤水分特征以及主要影响因子,可以为合理的防护林规划提供理论依据。

**关键词:**农田防护林;土壤含水量;林网内小气候;土壤蒸发;细根生物量密度

**中图分类号:**S714 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)05-0223-08

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.031

## Effects of Different Configurations of Farmland Shelterbelt System on Spatial Variation of Soil Moisture Content

WANG Dong<sup>1</sup>, XIAO Huijie<sup>1</sup>, XIN Zhiming<sup>2</sup>, JIA Hongtao<sup>3</sup>, CAO Qiqi<sup>1</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, Dengkou, Inner

Mongolia 015200; 3.College of Grassland and Environment Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052)

**Abstract:** The Hetao Irrigation Area is the largest irrigation area of the Yellow River region. Water scarcity is severe, and farmland shelterbelt is playing an important role in the soil water and salt regulation. In order to determine the effect of shelterbelt on soil moisture in farmland, this paper used traditional statistical methods to investigate the variation of soil moisture in four different configurations of farmland shelterbelt systems in early May 2019. The effects of soil evaporation, wind speed, light intensity, air relative humidity, fine root biomass and soil physical and chemical properties on soil moisture content were analyzed. The results showed that the soil water had obvious spatial structure characteristics. Soil moisture in different configurations of farmland shelterbelt system had obvious spatial heterogeneity. In the horizontal direction, soil moisture in farmland at different distances from the main forest belt increased first and then decreased, and the main influencing factors were wind speed, soil evaporation and the distribution of fine-root biomass density with in  $1H$  ( $H$  is the height of shelter forest). In the vertical direction, soil moisture increased with the increase of soil depth, and the main influencing factors were fine-root biomass density in 20—80 cm soil layer, soil bulk density and soil evaporation. soil moisture in different configurations of farmland shelterbelt system had an obvious difference, shelterbelt with a permeability of 40% (1 lines of *Populus popular's* + 2 lines of *Populus gansuensis* + 1 lines of *Populus popular's*) had the best protection effect and the highest soil moisture content. This study basically analyzed the soil moisture of different farmland shelterbelts and provided a

收稿日期:2020-02-19

资助项目:国家自然科学基金项目(31870706)

第一作者:王栋(1995—),女,在读硕士研究生,主要从事林业生态工程研究。E-mail:17800221821@163.com

通信作者:肖辉杰(1978—),男,副教授,硕士生导师,主要从事农田防护林和盐碱地改良研究。E-mail:herr\_xiao@hotmail.com

theoretical basis for rational shelterbelts and farmland construction.

**Keywords:** farmland shelterbelts; soil moisture content; microclimate in forest net; soil evaporation; fine-root biomass density

农田土壤水分是作物吸收水分的主要来源,在土壤物质交换、植物营养等方面起着重要的作用<sup>[1]</sup>,对农作物的生长影响显著。而土壤水分存在明显的空间异质性<sup>[2]</sup>,这是土壤非常重要的特性,是土壤学领域研究的重点对象。

我国西北、东北、华北等区域农田周边通常建有防护林带,有研究<sup>[3]</sup>表明,防护林带对田间土壤水分影响明显,其影响程度与林带距离密切相关,在 0~5H 范围内变化尤为显著。查同刚等<sup>[4]</sup>研究发现,防护林对农田内空气相对湿度和土壤含水量的水平空间分布具有显著影响,土壤含水量差异明显,最大值为 16.5%,最小值为 8.7%。何俊等<sup>[5]</sup>研究表明,农田林网内离林带不同距离处的小气候变化导致土壤含水量存在差异。刘丽霞<sup>[6]</sup>研究发现,随着与林带距离的增加,土壤含水量变化明显。垂直方向上 0—60 cm 范围内由于土壤质地的特殊性<sup>[7]</sup>和作物根系的生命活动,随着土层深度的增加农田土壤含水量也存在差异性。

由于林带根系可以水平延伸到田间吸收水分,因此林带根系分布对田间土壤水分影响显著,造成 0.5H 处农作物产量明显降低,且其影响主要集中在距离林带 10 m 范围内<sup>[8-9]</sup>。Qin 等<sup>[10]</sup>研究了荒漠绿洲农田防护林系统的土壤水分变化显示,防护林的根系吸收农田土壤水分,导致靠近防护林处的土壤含水量较低。有研究<sup>[11]</sup>发现,农田防护林树种新疆杨的最大根深均在 2 m 左右,树木根系水平方向最远延伸至农田约 18 m。王宁庚等<sup>[12]</sup>调查了宁夏引黄灌区防护林对农田土壤水分的影响发现,距离林带 1H 范围内土壤水分受林带影响明显。有研究<sup>[13-14]</sup>指出,林带根系中的细根( $\leq 2$  mm)是根系系统中最敏感的,是植物

吸收水分和养分的重要器官,其空间分布直接影响植物对土壤水分和养分的吸收。

综上,防护林对土壤水分的影响主要取决于防护林对林网内土壤蒸发、小气候以及林带根系分布的影响。但林网内各影响因素对农田土壤水分空间变异影响的重要性关系尚没有明确的研究,不同配置防护林网内的农田土壤水分空间异质性对比研究很少。基于此,本文对不同类型防护林网内农田土壤进行取样研究,分析其距农田防护林不同距离的水平与垂直变化规律,及其主要影响因素,以期为农田防护林建设提供数据基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古磴口县荒漠生态系统国家定位研究站,主要研究区位于中国林科院沙林中心第二试验场农田防护林内,地理坐标为(106°35′—106°59′E, 40°17′—40°29′N),海拔 1 040 m。该区属于温带干旱荒漠气候,年均降水量 142 mm,年均蒸发量为 2 387.6 mm,年均气温 7.6 °C,昼夜温差大,日照充足,年日照时间约 3 000 h。大风天气主要出现在 4—5 月,以西北风、西南风居多,年平均风速 3 m/s。年平均地下水位为 3~4 m,防护林内灌溉方式为引黄河水大水漫灌。防护林多为传统的小网格、窄林带,其树种主要有新疆杨、二白杨、小美早杨、美青 64、沙枣及乌柳,主要种植农作物为玉米、向日葵及西葫芦。试验地于 4 月 8 日灌溉,4 月 20 日播种。为研究作物生长初期田间土壤水分空间变异情况,于 5 月 1 日开始调查取样,对 4 种不同配置的农田防护林结构进行了调查(表 1)。

表 1 农田防护林基本信息

防护林编号	行数	树种	林带长/ m	林带 走向	株行距/ m	树龄/ a	树高/ m	胸径/ cm	疏透度/ %	农作物 种类
A	2	2 二白杨	≈340	南北	2.0×1.5	25	25	16.5	65	西葫芦
		1 小美早杨+				28	13			
B	4	2 二白杨+	≈340	南北	2.1×0.6	34	25	23.0	45	西葫芦
		1 小美早杨				28	14			
C	5	4 二白杨+	≈340	南北	5.0×4.0	33	20	内侧 40.0, 外侧 21.0	40	西葫芦
		1 小美早杨				13	10			
D	8	8 新疆杨	≈340	南北	5.0×4.0	48	23	内侧 38.0, 外侧 22.0	33	西葫芦

### 1.2 研究方法

2019 年 5 月 1—20 日在中国林科院沙林中心完

成采样和分析。在上述防护林网内的 4 块农田进行取样,每块试验样地为 120 m×420 m,主林带为西林

带,沿垂直于主林带方向布设 3 条样线,分别在其  $0.3H$ (农田边缘)、 $1H$ 、 $2H$ 、 $3H$ 、 $4H$ (距离东林带约  $0.9H$ )处布设取土和监测样点(图 1)。并选取 1 块没有防护林的农田进行取样,作为对照。为排除灌溉和降雨的影响,采样前 15 天无降雨及灌溉(据 2018 年地下水水位数据显示灌溉后约 12 天地下水水位恢复)。

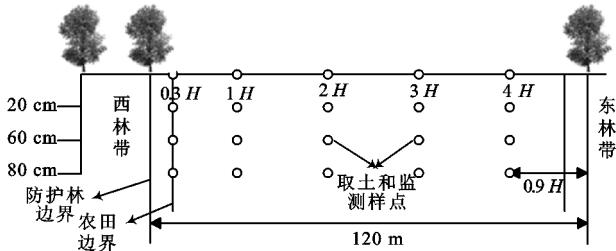


图 1 农田内试验样点布设

1.2.1 土壤含水量和容重 分别采集土壤 0—20, 20—40, 40—60, 60—80 cm 的样品,将取好的土样放入铝盒中,带回实验室,采用烘干法( $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 9 h)测定土壤含水量(SWC)。土壤容重采用环刀法测量。

1.2.2 小气候因子 采用自制的微型蒸渗仪(高 15 cm,内径 20 cm)连续 3 天测量农田防护林各测点处的土壤蒸发量( $E_v$ ),每天傍晚日落后(19:00—20:00)进行称重,称重时采用感量为 1.00 g 的电子天平。并用数字式照度计(GM1020)和手持式温湿度测量仪对各林网内测点 2 m 高处光照强度( $SR$ )、空气温度( $T_a$ )和相对湿度( $RH$ )进行平行观测,每天 8:00—10:00, 11:00—13:00, 17:00—19:00 各观测 1 次,连续 3 天观测。同时使用多通道风速仪(ZAGF-SKX-II)连续测量距农田防护林背风面  $0.3H$ 、 $1H$ 、 $2H$ 、 $3H$  及  $4H$  处的风速( $S_w$ )。

1.2.3 林带疏透度 用数码相机拍摄林带照片,使用 Photoshop 处理图片,采用加权平均法计算林带的疏透度值( $\beta$ )<sup>[15]</sup>。

1.2.4 植物根系 在农田防护林内,沿主林带林木大根方向在农田边缘(距离防护林  $0.3H$ )、 $0.5H$  及  $1H$  处取样,取样时发现  $1.2H$  处几乎无林木根系,所以仅分析  $1H$  内的林木根系。取样深度为 80 cm,垂直方向每层 20 cm。根钻直径 7 cm,每层取土体积为  $388\text{ cm}^3$ 。取样前 10 天无降水灌溉,在试验室内将土壤中的根全部洗出,把土倒入 0.2 mm 土壤筛中,挑出植物细根(直径  $<2\text{ mm}$ ),称重后置于烘箱中,烘干后再次称重<sup>[16]</sup>。

细根生物量密度:

$$FRBD = W_d / V_s$$

式中:FRBD 为细根生物量密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $W_d$  为根系干重( $\text{g}$ ); $V_s$  为土壤体积( $\text{cm}^3$ ),其中根钻取土体积为  $388\text{ cm}^3$ 。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 对数据进行统计分析,用 SPSS 分别对水平、垂直方向上的土壤水分含量进行单因素方差分析(ANOVA)和多重比较,用 Origin 2018 对各影响因子和 SWC 进行皮尔逊(Pearson)相关性分析,通径分析采用 Amos ver. 24.0 软件,研究影响土壤含水量的直接和间接因素。

## 2 结果与分析

### 2.1 农田内土壤水分分布特征

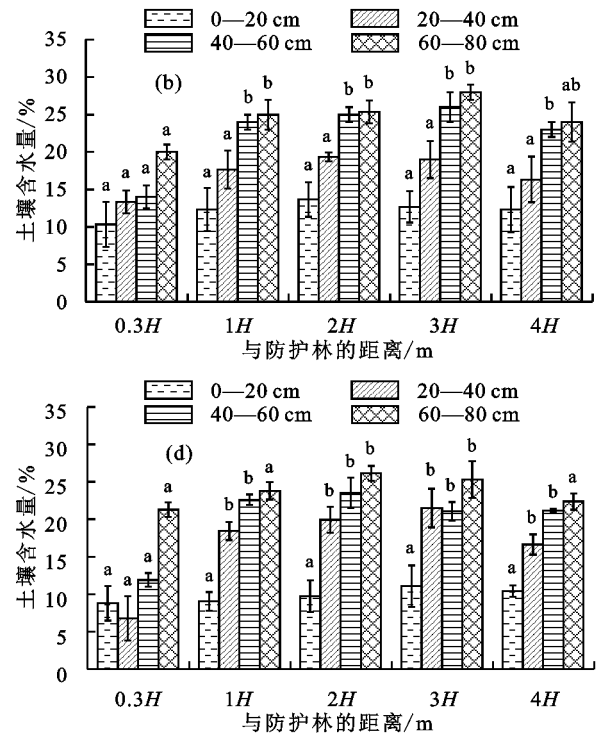
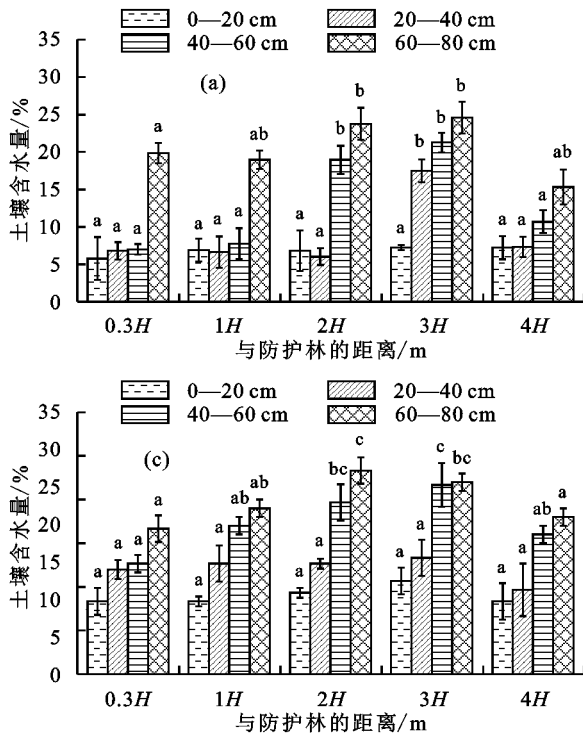
2.1.1 土壤水分状况空间变异特征 由图 2 可知,不同防护林网内农田 SWC 在水平方向上整体变化趋势基本一致,林缘处 SWC 最低,随着与两侧主林带距离的增加 SWC 逐渐增加,距离林带  $2H$  和  $3H$  处的农田中心 2 样点的 SWC 较为接近,无显著性差异。SWC 这种规律性空间变化在土壤深层(40—80 cm)较表层(0—40 cm)更为明显,林网内 0—40 cm 土层水平方向各样点之间的 SWC 无显著性差异,40—80 cm 土层林缘处( $0.3H$ )的 SWC 显著不同于林网内  $1H$ 、 $2H$  和  $3H$  处的 SWC ( $p < 0.01$ ),与  $4H$  处的 SWC 无显著差异,且  $1H$ 、 $2H$  和  $3H$  样点间的 SWC 差异性不显著。对于不同配置农田防护林, B、C、D 林网内 SWC 水平方向呈现规律性变化,林网 A 在 0—60 cm 土壤水分水平变化趋势不显著,60—80 cm 土壤水分变化规律较为明显。

由图 3 可知,不同林网内农田垂直方向上的 SWC 变化趋势也基本一致,随土层深度的增加 SWC 也自上而下逐渐增加。深层土壤 40—60 cm 与 60—80 cm 的 2 个土层间 SWC 无显著性差异( $p > 0.05$ )。  $1H$ 、 $2H$ 、 $3H$  和  $4H$  处垂直方向上 0—40 cm 的 SWC 明显低于 40—80 cm 土层,各样点上下土层之间的 SWC 差异性显著( $p < 0.05$ )。林网 B 与林网 C 内土壤垂直方向上土壤含水量变化趋势基本一致,林网 A 内接近两侧林带  $0.3H$ 、 $1H$  和  $4H$ ( $0.9H$ )样点土壤水分垂直变化趋势一致,林网 D 林缘  $0.3H$  土壤含水量显著低于其他样点,且表层土壤(0—40 cm)含水量随深度增加而减小,差异不显著。

2.1.2 林网内不同土层平均土壤含水量 由图 4 可知,不同配置农田防护林网内平均田间 SWC 差异性显著( $p < 0.05$ ),不同农田防护林内 60—80 cm SWC 无显著差异,0—60 cm 3 个不同土层 SWC 之间均存在明显差异性,且随着土层深度的增加,差异性减弱。0—20 cm 林网 A 和林网 B 与林网 C、林网 D 均存在显著性差异,且林网 A 与林网 B 也存在显著性差异性。20—40 cm 以及 40—60 cm 土层林网 A 内的 SWC 与其他 3 个农田平均 SWC 存在显著差异,林网 B、林网 C 和林网 D 的 SWC 无显著差异性。总体来

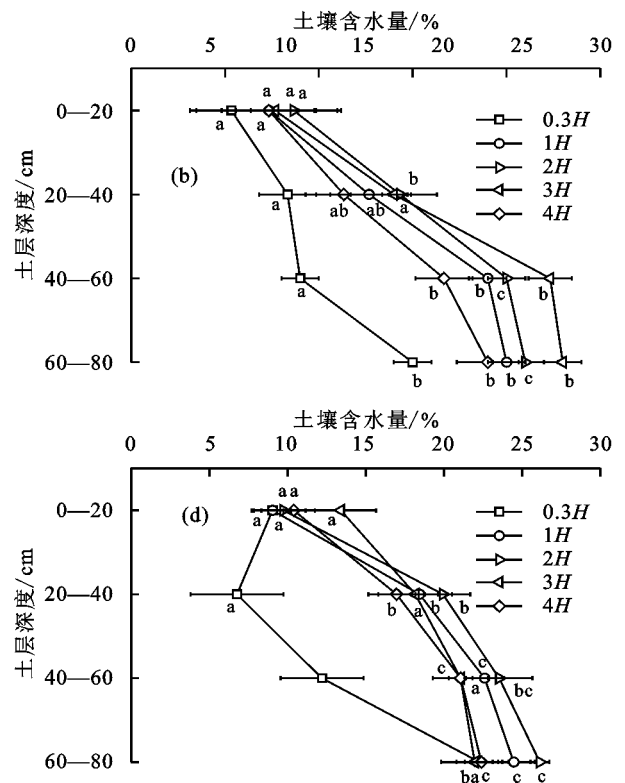
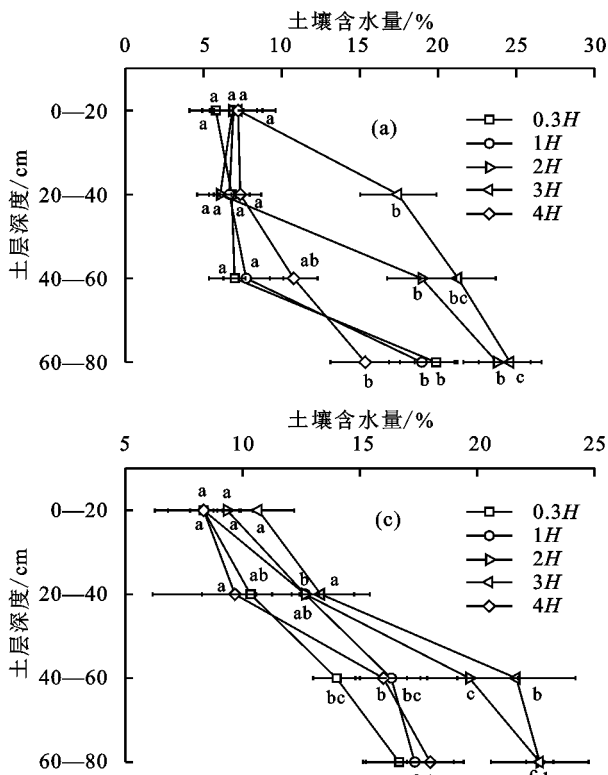
说,疏透度为 45% 的 1 小美早杨+2 二白杨+1 小美早杨林网内 SWC 最大,平均 SWC 为 19.4%;疏透度为 33% 的 8 行新疆杨次之,平均 SWC 为 16.4%;疏

透度 40% 的 4 二白杨+1 小美早杨防护林网平均 SWC 为 14.4%;疏透度为 65% 的 2 行二白杨防护林内 SWC 最低,为 12%。



注:图 a、b、c、d 分别为 2 二白杨、2 小美早杨+2 二白杨、1 小美早杨+4 二白杨和 8 新疆杨的农田防护林系统;图柱上方不同小写字母表示林网后不同距离土壤含水量的差异性( $p < 0.05$ )。下同。

图 2 4 个农田防护林土壤含水量的变异性



注:不同小写字母表示防护林不同深度土壤含水量的差异性( $p < 0.05$ )。

图 3 4 个农田防护林土壤含水量随土层深度的变化

## 2.2 土壤含水量变异的影响因素分析

### 2.2.1 土壤蒸发 防护林可有效减少土壤蒸发量,

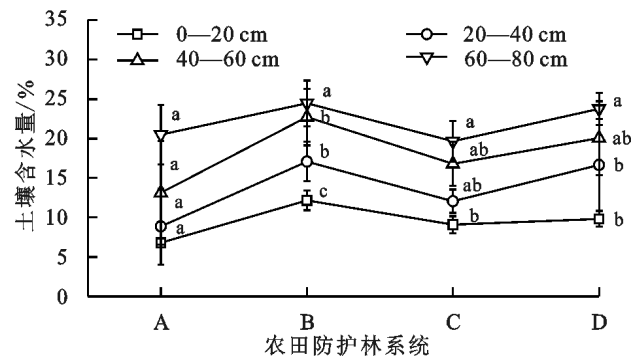
由表 2 可知,林网内各样点农田土壤的蒸发量( $E_v$ )均明显小于对照点  $E_v$ ,8 新疆杨的林网内农田  $E_v$  最



低(0.47 mm),其  $E_v$  减少了 55%;其次是 2 小美早杨+2 二白杨林网内农田土壤蒸发减少了 49%;1 小美早杨+4 二白杨减少了 38%;2 二白杨的林网防护效果最差, $E_v$  值为 0.75 mm,仅减少了 28%。水平方向上在主林带背风面  $E_v$  与林带距离呈正向关系,即随着距离增加土壤蒸发增大(表 2),从 0.3H 到 2H 随着与林带距离的增加  $E_v$  逐渐增加,在 2H 和 3H 处土壤蒸发量接近,4H 处样点位于对面林带 0.9H 处,受防护林带影响,上午太阳辐射量减少, $E_v$  稍有下降。2 行二白杨的林网内农田  $E_v$  变化相对较平缓。

2.2.2 林内小气候 防护林具有明显的防风效益,林网内各样点的风速( $S_w$ )均明显小于对照点(3.4 m/s),防风效果最突出的是 2 小美早杨+2 二白杨林带(1.39 m/s),其  $S_w$  减少了 74%;其次是 8 新疆杨减少了 64%,防风效果显著;4 行二白杨+1 行小美早杨减少了 58%;2 行二白杨的林网内  $S_w$  整体高于其他林网内风速,均值为 2.06 m/s,与对照点相比,风速减少了 39%,

防风效果相对较差。不同林带后水平方向上  $S_w$  整体呈现先减小后增加的趋势(表 3),0.3H 到 1H 的  $S_w$  降幅最大,1H 到 4H 随着与林带距离的增加  $S_w$  在逐渐增加。2 行二白杨的林网内农田  $S_w$  变化趋势较平缓,最大为 2.27 m/s,最小为 1.80 m/s。



注:A、B、C、D 表示农田防护林的编号,分别为 2 二白杨、2 小美早杨+2 二白杨、1 小美早杨+4 二白杨和 8 新疆杨的农田防护林系统;不同字母表示各处理间相同指标差异显著( $p < 0.05$ )。

图 4 4 个林网内农田不同土层含水量的差异性

表 2 林网内农田的土壤蒸发特征

观测因子	防护林	0.3H	1H	2H	3H	4H	均值	对照点
$E_v$ /mm	2 二白杨	0.73	0.76	0.78	0.8	0.7	0.75	1.24
	2 小美早杨 2 二白杨	0.49	0.47	0.64	0.55	0.52	0.53	
	1 小美早杨 4 二白杨	0.52	0.62	0.71	0.74	0.64	0.65	
	8 新疆杨	0.51	0.41	0.53	0.45	0.47	0.47	

注:0.3H、1H、2H、3H 和 4H 的数据均为各点 3 天观测数据的均值。

表 3 林网内农田的小气候特征

观测因子	防护林	0.3H	1H	2H	3H	4H	均值	对照点
$S_w$ /( $m \cdot s^{-1}$ )	2 二白杨	1.92	1.80	2.14	2.27	2.15	2.06	3.40
	2 小美早杨 2 二白杨	0.89	0.48	0.66	1.07	1.39	0.90	
	1 小美早杨 4 二白杨	1.61	0.97	1.13	1.54	1.93	1.44	
	8 新疆杨	1.51	0.79	0.87	1.34	1.59	1.22	
SR/Lux	2 二白杨	75750	97675	99673	96687	69367	87830	104733
	2 小美早杨 2 二白杨	47137	66549	76292	74409	45365	61951	
	1 小美早杨 4 二白杨	47594	71841	73094	76336	59994	65772	
	8 新疆杨	46627	67685	75700	76777	48102	62978	
RH/%	2 二白杨	23.1	23.9	23.1	22.7	23.2	23.2	21.7
	2 小美早杨 2 二白杨	24.4	26.9	25.8	24.7	26.1	25.6	
	1 小美早杨 4 二白杨	24.6	26.1	25.6	24.7	24.2	25.0	
	8 新疆杨	24.9	27.2	26.5	25.1	26.9	26.1	
$T_a$ /°C	2 二白杨	20.2	20.9	20.7	20.5	20.1	20.5	23.2
	2 小美早杨 2 二白杨	19.4	19.5	20.0	19.7	19.5	19.6	
	1 小美早杨 4 二白杨	19.3	19.7	20.5	20.0	19.9	19.9	
	8 新疆杨	19.5	19.6	19.9	20.3	20.1	19.9	

注:0.3H、1H、2H、3H 和 4H 的数据均为各点 3 天观测数据的均值。

由于防护林的遮蔽作用,防护林能有效减少太阳光照强度,林网内的光照强度(SR)小于对照点(114 733 Lux),在水平方向上林缘 0.3H 样点光照强度显著低

于林网内其他样点(表 3),从 1H 到 3H 样点,随着与主林带距离的增加 SR 逐渐增加,0.3H 和 4H 靠近林缘,其 SR 显著减小。

防护林具有明显的降温增湿作用,林网内的气温( $T_a$ ,小于对照点(23.2 °C),空气相对湿度( $RH$ )大于对照点(22.1%)。由于林带附近地面得到的光照和太阳辐射的能量较小,林缘附近的  $T_a$  显著低于林网内其他样点的气温,1H 和 4H 的  $T_a$  较小,2H 处气温达到最高,然后缓慢减小。受风速和乱流交换的作用,在主林带背风面随着与主林带距离的增加, $RH$  整体呈现先增大到 1H 后减小的趋势,在 4H 处稍有增加,最小值出现在 0.3H 处。总体来看,8 新疆杨  $RH$  最大为 26.1%,相对于对照点增加了 20%,其次是 2 小美早杨+2 二白杨增加了 18%和 1 小美早杨+4 二白杨增加了 15%;1 小美早杨+4 二白杨、2

表 4 4 种结构防护林 0.3H 和 1H 处不同深度的细根生物量密度

单位:g/cm<sup>3</sup>

土层 深度/cm	2 二白杨			2 小美早杨+2 二白杨			1 小美早杨+4 二白杨			8 新疆杨		
	0.3H	0.5H	1H	0.3H	0.5H	1H	0.3H	0.5H	1H	0.3H	0.5H	1H
0—20	1.20	0.43	0.03	0.97	0.59	0.00	0.87	0.10	0.04	0.42	0.51	0.05
20—40	2.45	2.75	0.06	2.47	0.16	0.04	2.66	1.05	0.04	10.20	0.51	0.05
40—60	4.71	3.91	0.04	1.02	0.34	0.05	4.05	2.19	0.08	2.92	0.90	0.09
60—80	0.46	0.87	0.00	0.32	0.10	0.03	1.22	0.16	0.00	2.11	0.32	0.02

### 2.2.3 主要影响因素途径分析和相关性分析

(1)林网内水平方向上土壤水分影响因素分析。由于林网对距主林带不同距离处的防护效益不同,使得林网内不同样点的风速( $S_w$ )、光照强度( $SR$ )、气温( $T_a$ )、空气相对湿度( $RH$ )、土壤蒸发量( $E_v$ )和防护林的细根生物量各不相同,导致样点间  $SWC$  差异显著。由于根系的取样点在 0.3H~1H 范围内,与其他因素的取样点不一致,所以在水平方向上分析各影响因素的作用时,暂不考虑其影响。将不同农田防护林网内的  $SWC$  和各影响因素  $E_v$ 、 $S_w$ 、 $SR$ 、 $T_a$  以及  $RH$  进行相关性分析。由表 5 可知, $SWC$  与  $S_w$  具有极显著负相关性,与  $RH$  具有极显著正相关性,相关系数分别为 -0.642 和 0.594;与  $E_v$  的相关系数为  $r = -0.445$ ,为显著正相关;与  $SR$  和  $T_a$  无显著相关性。 $SR$ 、 $S_w$  以及  $T_a$  和  $E_v$  具有极显著正相关性( $p < 0.01$ ),相关系数分别为 0.692,0.630,0.705, $RH$  和  $E_v$  存在极显著负相关性( $r = -0.725$ ,  $p < 0.01$ )。 $RH$  为负相关,林网内空气湿度越小,土壤蒸发越强烈。其他因素皆为正相关,风速越大,土壤蒸发越强烈; $SR$  越大, $T_a$  越高,空气水汽压饱和差越大,水汽扩散的越快,土壤蒸发越大。

由表 6 可知,为了进一步分析  $SWC$  和相关变量间的直接作用和间接作用,在相关分析的基础上进行途径分析,通过直接途径系数和间接途径系数表示表明  $E_v$ 、 $S_w$ 、 $SR$ 、 $T_a$  以及  $RH$  与  $SWC$  的直接和间接因果关系<sup>[17]</sup>。对  $SWC$  的直接影响因素中,按其重要

性排序为  $S_w > E_v > SR > RH > T_a$ ,其中  $S_w$  和  $E_v$  对  $SWC$  的直接影响为负效应, $SR$ 、 $RH$  和  $T_a$  对  $SWC$  的直接影响为正效应,直接标准化系数分别为 -0.44, -0.31,0.28,0.22,0.15。说明  $SWC$  主要受  $S_w$  和  $E_v$  的直接影响,其中  $S_w$  是最主要的直接影响因素,林带通过降低近地表层的风速,影响土壤含水量。 $SR$  和  $T_a$  对  $SWC$  的直接作用不大,但均为正值,与以往的研究和经验相反,但其相关系数均为负,因而  $SR$  和  $T_a$  对  $SWC$  的间接作用是负的,其间接途径系数之和的绝对值大于直接途径系数,间接途径系数分别为 -0.31 和 -0.37, $E_v$  和  $S_w$  对  $SR$  和  $T_a$  的间接途径系数之和的贡献率比较大。 $RH$  对  $SWC$  的直接途径系数为 0.22,间接途径系数之和为 0.38,说明  $RH$  通过间接因素进一步加强对  $SWC$  的影响。

表 5 水平方向影响因素相关性分析

指标	$E_v$	$S_w$	$SR$	$RH$	$T_a$
$SWC$	-0.445*	-0.642**	-0.031	0.594**	-0.220
$E_v$	1.000	0.630**	0.692**	-0.725**	0.705**
$S_w$		1.000	0.285	-0.799**	0.598**
$S_R$			1.000	-0.434	0.811**
$RH$				1.000	-0.532*
$T_a$					1.000

注: \* 表示显著性水平在  $p < 0.05$ ; \*\* 表示显著性水平在  $p < 0.01$ 。

(2)林网内垂直方向上土壤水分影响因素分析。由于耕作扰动表土层导致土壤容重以及土壤水分发生变化,所以剔除 0—20 cm 的数据,将林网内 0.3H 和 1H

处 20—80 cm 的 SWC 与 FRBD 和土壤容重进行相关性分析,将 2H 和 3H 处的 SWC 与土壤容重进行相关性分析,0.3H 处的 SWC 和 FRBD 呈显著负相关关系 ( $r = -0.676$ ),与土壤容重无显著相关性 ( $r = -0.252$ ),但土壤容重是影响 1H、2H 和 3H 处 SWC 垂直方向变

化的影响因素,具有显著负相关关系 ( $r = -0.582^*$ ,  $-0.544^*$ ,  $-0.544^*$ ,  $p < 0.05$ ),与 FRBD 无显著相关性 ( $r = -0.111$ )。研究表明,主林带根系吸收田间土壤水分是导致 0.3H 处 SWC 垂直变化的主要影响因素,林带 FRBD 对 SWC 的影响范围小于 1H。

表 6 水平方向的影响因素与土壤含水量间的通径系数

因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数总和	间接通径系数				
				$E_v$	$S_w$	SR	RH	$T_a$
$E_v$	-0.445	-0.31	-0.14		-0.28	0.19	-0.16	0.11
$S_w$	-0.642	-0.44	-0.28	-0.28		0.08	-0.18	0.09
SR	-0.031	0.28	-0.31	-0.21	-0.12		-0.09	0.12
RH	0.594	0.22	0.38	0.23	0.35	-0.12		-0.08
$T_a$	-0.220	0.15	-0.37	-0.22	-0.26	0.23	-0.12	

土壤蒸发对表层(0—40 cm)SWC 的影响明显高于深层(40—80 cm)。  $E_v$  与各层土壤 SWC 的相关性各不相同,0—20 cm 土层的 SWC 与  $E_v$  达到极显著负相关 ( $r = -0.573^{**}$ ,  $p < 0.01$ ),20—40 cm 土层的 SWC 与  $E_v$  达到显著负相关 ( $r = -0.505^*$ ,  $p < 0.05$ ),40—60,60—80 cm 土层的 SWC 与  $E_v$  无显著相关关系 ( $r = -0.36, -0.19$ )。土壤表层水分蒸发也是导致土壤水分垂直变化的重要原因之一。

### 3 讨论

本研究发现,不同结构农田防护林内距主林带不同距离处不同土层的 SWC 均呈有规律性的变化,且主林带背风面不同距离的 SWC 具有明显的空间异质性。林带对农田 SWC 的影响是多种因子相互作用的结果。取样时试验地地下水位为 3.5 m,土壤取样深度为 0.8 m,所以忽略地下水的影响。

水平方向上的直接影响因素主要为  $S_w$  和  $E_v$ ,  $S_w$  对 SWC 具有极显著的负向影响关系,  $S_w$  越大, SWC 越小<sup>[18]</sup>。SR、RH 和  $T_a$  主要通过其他因素的间接作用对 SWC 产生影响。SR 和  $T_a$  对 SWC 的直接影响为正向效应,可能是由于  $E_v$  和  $S_w$  对 SWC 的影响抵消了 SR 和  $T_a$  对 SWC 的影响。

2 小美早杨+2 二白杨的防护林防风效果最佳,林网内 SWC 最大,2 二白杨的防护林防护效果相对较小,分析原因为通风结构林带枝下通风空隙较大,气流更加顺畅,经过林带时动能消耗较少,  $S_w$  降低不明显,防护林改善小气候的作用较弱<sup>[19-20]</sup>。与本研究结果类似,刘丽霞等<sup>[6]</sup>研究表明,在据林带 3H 的防护范围内 0.3H 的土壤水分最小,1.5H 处最高,且风速对 SWC 的影响较为显著,二者呈负相关关系,与本研究结果相似。有研究<sup>[21-22]</sup>发现,疏透度为 0.30~0.50 的稀疏林带结构防风效应最佳,本研究中

不同配置的农田防护林中 2 小美早杨+2 二白杨(45%)、1 小美早杨+4 二白杨(49%)、8 新疆杨(33%)的防护林为疏透结构,防风效应较好。

林网内 1H 处的小气候条件最适宜,但是其 SWC 低于 2H 和 3H,说明林带根系吸收周围土壤水分供于植物蒸腾作用,严重影响范围可达 0.3H,影响范围可达 1H,但是小于 2H,这与肖庆礼<sup>[11]</sup>和刘康等<sup>[23]</sup>的研究结果基本一致,且在林带 1H 范围内,根系分布对 SWC 的影响显著大于小气候因素,所以水平方向上 0.3H 处含水量最低,1H 和 4H 样点处邻近防护林带,SWC 相对较低,2H 和 3H 样点处 SWC 不受防护林根系的影响,SWC 相对较高,但是在水平方向上 1H 处 SWC 与 2H 和 3H 处的 SWC 无显著性差异。

防护林内 0—40 cm 的 SWC 无显著性变化,直接原因是 4 月是春耕季节,翻耕深度可达 30 cm,人为扰动频繁,表层土受外界影响大<sup>[23]</sup>;而 40—80 cm 的 SWC 差异性显著,主要表现在 0.3H 与 2H、3H 之间,主要原因是防护林细根拦截农田土壤水分。而在 2H 和 3H 处的土壤容重和 SWC 呈明显的负相关关系,土壤容重基本呈逐渐减小的趋势,20—80 cm 土壤水分随深度增加的变化趋势与土壤容重变化相吻合,与李祥东<sup>[24]</sup>的研究结果基本一致。

### 4 结论

本研究表明,在窄林带小网格的农田防护林系统内土壤水分具有明显的空间变异性。

(1)水平方向上由于林网内小气候、土壤蒸发的影响,土壤含水量与林带距离呈正向关系,在 2H 和 3H 处达到最大值。距离林带 1H 以内土壤含水量主要受细根吸水的影响。远离林带处风速、土壤蒸发是最重要的直接影响因素。

(2)垂直方向上随着土层深度的加深土壤含水量

从表层向下逐渐增加,林缘处(0.3H)的土壤含水量受根系生物量的影响,远离林带处土壤容重为土壤含水量的主要影响因子。土壤蒸发也是造成了表层的土壤含水量与深层土壤含水量差异性显著的原因。

(3)总体来说从影响农田土壤水分的角度考虑,疏透度为45%的2行小美旱杨+2行二白杨防护效果最佳,土壤含水量最高。

(4)建议在农田防护林建设时林带疏透度保持在0.3~0.5,疏透结构林带的防护效益最好,可以保持最大农田土壤含水量。不同结构的农田防护林削弱风速、改善小气候的程度和范围具有明显的差异,可根据其最佳的防风效益距离,将河套灌区的小网格林网适当扩大,趋利避害,最大程度发挥防护林的效益。防护林与农作物之间的距离控制在0.3H~1H,在防护林的有效防护范围内种植农作物有利于作物的高产稳产。

#### 参考文献:

- [1] 胡海清,刘洋,孙龙,等.火烧对不同林型下森林土壤水分物理性质的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):162-165.
- [2] 沈浩,吉力力·阿不都外力,玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J].应用生态学报,2015,26(3):769-776.
- [3] 张鑫童.农田防护林网内小气候因子的分布与小麦产量关系的研究[D].合肥:安徽农业大学,2012.
- [4] 查同刚,孙向阳,于卫平,等.宁夏地区农田防护林结构与小气候效应[J].中国水土保持科学,2004,2(4):82-86.
- [5] 何俊,李妍红.宁夏平原农田防护林小气候效应及对玉米产量的影响[J].广东农业科学,2019,46(7):1-7.
- [6] 刘丽霞.绿洲农田防护林系统水分生态特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [7] 王全九,毕磊,张继红.新疆包头湖灌区农田土壤水盐热特性空间变异特征[J].农业工程学报,2018,34(18):138-145.
- [8] 宋翔,庞国锦,颜长珍,等.干旱区绿洲农田防护林增产效益研究:以民勤绿洲为例[J].干旱区资源与环境,2011,25(7):178-182.
- [9] 乔艳琴.不同植被间土壤水分与养分竞争研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [10] Qin S, Gao G, Wei H, et al. Spatial-temporal variability of soil water content in a cropland-shelterbelt-desert site in an arid inland river basin of Northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 873-885.
- [11] 肖庆礼.黑河中游绿洲农田和防护林带土壤水分运动与水量交换[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [12] 王宁庚,左忠,潘占兵.宁夏引黄灌区农田防护林网胁迫地情况调查研究[J].宁夏农林科技,2016,57(11):22-25.
- [13] 郭京衡,曾凡江,李崇君,等.塔克拉玛干沙漠南缘三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.
- [14] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, et al. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest [J]. Science, 2013, 339(6127):1615-1618.
- [15] 关文彬,李春平,李世锋,等.林带疏透度数字化测度方法的改进及其应用研究[J].应用生态学报,2002,13(6):651-657.
- [16] 王宝驹.南疆地区枣麦农林复合系统根系互作研究[D].新疆石河子:石河子大学,2014.
- [17] 韩姣姣,段旭,赵洋毅,等.元谋干热河谷不同土地利用类型下土壤水分特征及其主控因子[J].干旱区资源与环境,2018,32(1):168-173.
- [18] 张聪聪,陈效民,张勇,等.气象因子对太湖地区旱作农田土壤水分动态的影响[J].中国农业科学,2013,46(21):4454-4463.
- [19] Van Thuyet D, Van Do T, Sato T, et al. Effects of species and shelterbelt structure on wind speed reduction in shelter [J]. Agroforestry Systems, 2014, 88(2): 237-244.
- [20] 张红利,张秋良,马利强,乌兰布和沙地东北缘不同配置的农田防护林小气候效应的对比研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(11):191-194.
- [21] 乌拉,张国庆,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠绿洲农田防护林防风阻沙规律及防护效益[J].内蒙古林业科技,2009,35(1):14-18.
- [22] Qiao Y, Fan J, Wang Q. Effects of farmland shelterbelts on accumulation of soil nitrate in agro-ecosystems of an oasis in the Heihe River Basin, China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 23(5): 182-192.
- [23] 刘康,朱玉伟.新疆杨农田防护林胁迫地影响的研究[J].新疆环境保护,1996,18(4):36-43,53.
- [24] 李祥东.西北干旱区土壤水分时空变异特征及其影响因素研究[D].北京:中国科学院大学,2019.