

风沙区不同配置农田防护林防护效应及其对农田土壤水分的影响

杨彦^{1,3}, 沈留记², 姜乐璞^{1,3}, 赵亚冲^{1,3}, 唐远胜^{1,3}, 田佳禾², 周正立^{2,3}

(1.塔里木大学 生命科学与技术学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2.塔里木大学 园艺与林学学院, 新疆 阿拉尔 843300; 3.塔里木盆地生物资源保护利用兵团重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要: [目的] 明确风沙区不同配置农田防护林产生的防护效果差异以及影响田间土壤含水率的作用因子, 为该地区水分管理和土地利用提供理论依据。[方法] 选择新疆阿拉尔市十团3种典型配置的农田防护林, 研究不同配置防护林内土壤含水率、风速、光照强度、空气温湿度等因素, 综合分析土壤含水率变异性决定因子。[结果] 疏透度为41%的5行新疆杨对田间小气候改善作用在0~1 H范围最显著, 疏透度为47%的1行胡杨+2行新疆杨的林内有效防护距离最长, 且田间土壤含水率显著大于5行新疆杨且大于4行新疆杨。5行新疆杨林内土壤含水率主要受空气温度、湿度、光照强度的影响, 4行新疆杨和1行胡杨+2行新疆杨土壤含水率与防护林距离和土层深度有关。总体来看, 林带疏透度对土壤含水率有直接负向作用, 同时土壤容重随土层深度变化间接对含水率产生负向影响。[结论] 合理调整农田防护林配置结构, 能够提高防护林防护效益, 为风沙区作物生长提供有利条件, 同时促进当地水资源合理利用和可持续发展。

关键词: 农田防护林; 土壤含水率; 防护效益; 疏透度; 风沙区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0011-11

中图分类号: S727.24, S152.7

文献参数: 杨彦, 沈留记, 姜乐璞, 等. 风沙区不同配置农田防护林防护效应及其对农田土壤水分的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 11-21. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.002; Yang Yan, Shen Liuji, Jiang Lepu, et al. Protective effects of different configurations of farmland shelterbelts in wind-sand areas and their impacts on soil moisture in farmland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 11-21.

Protective Effects of Different Configurations of Farmland Shelterbelts in Wind-sand Areas and Their Impacts on Soil Moisture in Farmland

Yang Yan^{1,3}, Shen Liuji², Jiang Lepu^{1,3},

Zhao Yachong^{1,3}, Tang Yuansheng^{1,3}, Tian Jiahe², Zhou Zhengli^{2,3}

(1.School of Life Science and Technology, Tarim University, Alar, Xinjiang,

843300, China; 2.School of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alar, Xinjiang, 843300, China;

3.Key Laboratory of Biological Resources Protection and Utilization Corps of Tarim Basin, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: [Objective] The differences in protective effects generated by different configurations of farmland shelterbelts were determined in wind and sand areas, as well as the influencing factors on soil moisture content in fields, in order to provide a theoretical basis for water management and land use in this region. [Methods] Three typical configurations of farmland shelterbelts in the Tenth Regiment of Alar City, Xinjiang Wei Autonomous Region, were studied by measuring soil moisture content, wind speed, light intensity, and air temperature and humidity within different configurations of shelterbelts. [Results] The most significant improvement in field microclimate within the range of 0~1 tree height was observed with a shelterbelt

收稿日期: 2023-11-20

修回日期: 2024-01-12

资助项目: 新疆生产建设兵团重点领域科技攻关计划项目“南疆沙区生态经济型屏障构建及产业链延伸技术研发与示范”(2021AB022); 中国海洋大学—塔里木大学联合资助项目(ZHYLH201903); 新疆生产建设兵团塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室项目(BRFW1902)

第一作者: 杨彦(1999—), 女(汉族), 山西省大同市人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区水土保持与荒漠化防治。Email: 10757213063@stu-mail.taru.edu.cn.

通信作者: 周正立(1970—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区伊犁市人, 硕士, 教授, 主要从事风沙治理与沙产业开发、干旱区植物生物多样性保育等方面的研究。Email: zzlzkytd@163.com.

porosity of 41% in the case of five rows of *Populus alba* var. *pyramidalis*. The longest effective protection distance within the shelterbelt with a porosity of 47% was achieved with one row of *Populus euphratica* and two rows of *P. alba* var. *pyramidalis*. Moreover, the soil moisture content in the field was significantly higher for the configuration of one row of *P. euphratica* and two rows of *P. alba* var. *pyramidalis* compared with five rows of *P. alba* var. *pyramidalis* and four rows of *P. alba* var. *pyramidalis*. The soil moisture content within the shelterbelt of five rows of Xinjiang poplar was primarily influenced by air temperature, humidity, and light intensity. On the other hand, the soil moisture content in the case of four rows of *P. alba* var. *pyramidalis* and one row of *P. euphratica* and two rows of *P. alba* var. *pyramidalis* was related to the distance of the shelterbelt and soil depth. Overall, the porosity of the shelterbelt had a direct negative effect on soil moisture content, while soil bulk density indirectly affected the moisture content through soil depth. [Conclusion] By adjusting the configuration and structure of farmland shelterbelts, it is possible to increase the protective efficiency of the shelterbelts and to provide favorable conditions for crop growth in sandy areas. This adjustment can also serve as a theoretical basis for regulating local water resources.

Keywords: farmland shelterbelt; soil moisture content; protective benefits; porosity; sandy area

南疆地区属暖温带大陆性干旱荒漠气候,生态环境极其脆弱,抗干扰能力差,其农业灌溉区风沙侵害、土壤侵蚀严重,水资源分布极不平衡^[1]。为保护农田的生态安全,20世纪90年代,南疆地区建成了“窄林带、小网格”模式的农田防护林网络体系,成为南疆地区人工绿洲生态系统不可或缺的组成部分,在减少土壤侵蚀、防风阻沙和保护作物、牲畜和农田方面发挥着重要作用^[2];同时,农田防护林也成为保障农业生产、促进可持续发展的重要人工生态工程^[3-4]。前人^[5-7]在防护林防护效益研究过程中发现,由于林带的庇护作用,农田内部风速、空气温度、湿度、光照强度较旷野处均有较大改善。开展农田防护林建设,除了可以改善田间小气候外,对水土流失防治也具有重要作用。在干旱区,土壤水分是重要的水资源,了解干旱区农田土壤水分异质性变化有利于水资源管理和生态系统调节。聂哲^[8]、王栋^[9]、刘丽霞等^[10]研究发现防护林防护的农田土壤含水量较无农田防护林防护有所增加,且随着与林带距离的增加,土壤含水量呈现出规律性变化。前人对土壤含水率变化规律的研究认为,由于土壤性质、地形、植被、气候和人类活动的复杂性^[11-14],使得影响土壤含水率的主要因素也随着时间和空间尺度的改变而改变,从而导致土壤含水率分布格局复杂,出现高度的时空变异性^[15]。综上所述,前人对农田防护林防护效益以及土壤水分异质性的研究已取得颇多成果。但在现有的研究中,较少考虑农田防护林的不同配置及其产生的防护效果对土壤含水率是否存在影响。为此,本文将以南疆阿拉尔市十团3种典型农田防护林为例,探究农田防护林不同配置结构的防护效果差异,以期能为农田防护林建设提供数据基础。结合土层深度、林带疏透度、小气候等因子综合分析南疆阿拉尔市十团地区农田

土壤含水率的主要影响因子,明确不同配置防护林内田间土壤水分变化特征,为该地区水分管理和土地利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验位于新疆生产建设兵团一师阿拉尔市十团(81°17′56.52″E,40°32′36.90″N)。该地区北起天山南麓山地,南至塔克拉玛干沙漠北缘,属于暖温带大陆性干旱荒漠气候,平均海拔1 014 m^[16],最高海拔1 028 m,最低海拔1 000 m,年均气温10.7℃,最高气温43℃,最低气温-27℃,无霜期平均220 d。垦区年均太阳辐射559.67~612.41 kJ/cm²。年均日照时数2 556.3~2 991.8 h,年均降水量40.1~82.5 mm,年均蒸发量1 876.6~2 558.9 mm^[17]。主导风向是西北风和西南风,年平均风速3.5~4.5 m/s^[18]。冬季以西北风为主,夏季以西南风为主。该地区植被覆盖度较低,周边农田防护林多为小网格、窄林带,其树种主要有新疆杨、胡杨和柳树,主要种植农作物为棉花。当地农田主要采用的灌溉方式为深层渗透灌溉和滴灌灌溉,地下水年内动态与农业灌溉联系密切,地下水水位在灌溉期(3—10月)呈下降趋势,地下水埋深变大。灌溉期过后,地下水水位开始抬升,全年变幅较小,地下水埋深总体较浅,大部分埋深介于3~6 m间^[19]。

1.2 样地选择

本试验在新疆阿拉尔市十团共选择3种不同配置的农田防护林,分别为:4行新疆杨(P₁)、5行新疆杨(P₂)、1行胡杨+2行新疆杨(P₃),各配置防护林的立地情况、管理措施基本一致。3种配置模式防护林的基本状况详见表1。

表1 不同农田防护林带的基本状况

Table 1 Different configurations of field shelterbelts

林带编号	树种	行数	林带长度/m	林带走向	株行距/m	疏透度/%	树高/m	胸径/cm	作物种类
P ₁	4行新疆杨	4	190	东西	2.0×1.5	62	22.30	27.9	棉花
P ₂	5行新疆杨	5	270	东西	1.6×1.0	41	21.28	29.97	棉花
P ₃	1行胡杨+2行新疆杨	3	240	东西	1.8×1.0	47	胡杨 18.70 新疆杨 24.18	18.26 18.33	棉花

1.3 研究方法

在阿拉尔市十团样地灌溉 15 d 后,于 2023 年 5 月 25 日至 6 月 15 日进行采样,在各样地垂直主林带方向,将农田均分为 3 个等面积的小区作为重复,在每个小区的中轴距林缘 0 H(树高),0.5 H,1.0 H,1.5 H,2.0 H 处布设取土和监测样点。

1.3.1 小气候因子 连续 3 d,在各样地监测点以及对照裸地内,使用风速仪分别在距离地面 0.2,0.5,1.0 和 1.5 m 高度,连续测量各监测点的风速,计算防风效能(E)。

$$E_{x,z} = \frac{U_{0,z} - U_{x,z}}{U_{0,z}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $U_{x,z}$ 为距林带 x 处 z 高度的平均风速; $U_{0,z}$ 为同一距离相同高度下对照裸地的平均风速。

选择晴朗无风的天气,使用 C 2—3 照度计在每天的 10:00,15:00,20:00 时,于同一高度记录各监测点空气温度和相对湿度,同时各个观测点距离地面高度 2 m 处,使用数字式照度计测定光照强度^[20]。

1.3.2 疏透度 在林带 20—30 m 处,距地面 1.5 m 高度,使用数码相机拍摄林带影像,借助图像处理软件(Photoshop, ENVI),确定林干、林冠平均高度,统计出林冠和林干所占的像素数和林冠断面所在影像的总像素数,通过加权平均法计算林带的疏透度值(β)^[21-22]。

$$\beta = (\beta_1 \times h_1 + \beta_2 \times h_2) \times 100 \quad (2)$$

式中: β_1 (林冠疏透度)=林冠填充像素数/林冠断面所在影像的总像素数; h_1 为林冠平均高度; β_2 (林干疏透度)=林干填充像素点数/林干断面所在影像的总像素数; h_2 为林冠平均高度。

1.3.3 土壤含水率和容重 于 5 月 25 日至 6 月 10 日期间,每隔 5 天在各采样点采集 1 次土壤样品作为重复^[23],共计 3 次。在每个采样点上,分别采集 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 的土壤样品。将取好的土样放入铝盒,采用烘干法(105 ℃, 9 h)测定土壤含水率。同时挖土壤剖面,采用环刀法测量土壤容重^[24]。

$$\text{土壤含水率} = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100\% \quad (3)$$

式中: W_2 为新鲜土壤样品质量(g); W_1 为烘干土样质量(g)。

1.3.4 数据处理及分析方法 采用 SPSS(Statistics 26)软件对农田防护林内的土壤含水率、小气候等数据进行统计分析和单因素方差分析(ANOVA),采用 Origin 2021 软件进行图像绘制。选择 8 个相关因素,包括土层深度、土壤容重、空气温度、湿度、光照强度、风速与防护林距离、防护林疏密度作为可能的影响因子,使用 R 语言软件包(Performance Analytics)分析与土壤含水率的相关性。使用 SPSS 和 Origin 将与土壤含水率显著相关的因素进行 PCA 分析、建立逐步回归方程、进行通径分析确定土壤含水率主要影响因子。

2 结果与分析

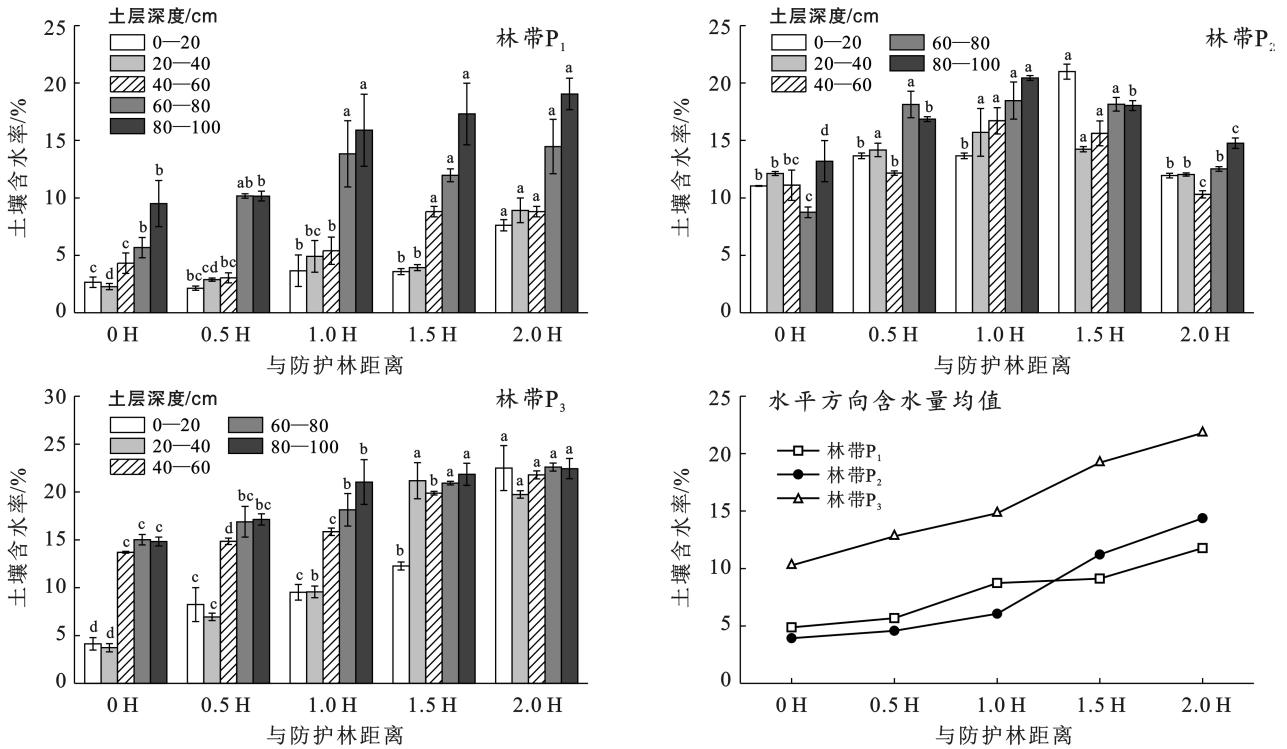
2.1 林内土壤水分变化特征

2.1.1 水平梯度上农田土壤水分变化 由图 1 可以看出,3 种配置的防护林内农田土壤含水率均在林缘处最低,且随着与林带距离的增加,P₁,P₃林带防护下的农田各土层土壤含水率均呈现逐渐升高的趋势,2 H 处深层土壤(40—100 cm)含水率显著高于林缘(0 H)处,但与 1.0 H 和 1.5 H 处差异不显著,而浅层(0—40 cm)土壤含水率在水平方向变化趋势显著。P₂林带防护下的农田各土层土壤含水率随林带距离的增加均呈“先升后降”的趋势,0—20 cm 土层在 1.5 H 处达到最大值,并与其他距离处的土壤含水率均存在显著性差异;20—100 cm 土层在 1.0 H 处达到最大值,且同一土层的含水率除与 0.5 H 处 20—40 cm,60—80 cm,以及 1.5 H 处各土层差异不显著外,其余各土层含水率在不同距离处均存在显著差异。在各采样点,将 0—100 cm 土层的土壤含水率进行平均,可以看出随林带距离的增加,各林带防护下的农田土壤含水率均在 0~0.5 H 逐渐上升,且 P₂和 P₃的土壤含水率>1.0 H 处迅速上升。不同距离处各配置的土壤含水率在 1.0 H 前表现为:P₃>P₁>P₂,1.5 H 后表现为:P₃>P₂>P₁。

2.1.2 垂直梯度上农田土壤水分变化 由图 2 可以看到,P₁,P₃林带防护下的农田土壤含水率在垂直方向上变化趋势基本一致,均表现为随土层深度的增加

而逐渐增大。林带 P₁ 农田内不同距离的土壤含水率在土层深度为 80—100 cm 处含水率显著大于 40—60 cm; P₃ 则与之相反, 土壤含水率在 20—60 cm 土层显著增加, 而在 60—100 cm 土层变化不显著。林带 P₂ 在垂直方向上土壤含水率变化并不规律, 距林带

1.0 H 处含水率随土层深度的增加而增加, 0 H, 0.5 H, 1.5 H, 2.0 H 处含水率则随着土层深度增加表现为“先降后升”。将不同距离土壤含水率进行平均, 可以看到随着土层深度的增加林内的农田土壤含水率平均增幅表现为: P₁ > P₃ > P₂。



注: H 表示树高。P₁, P₂, P₃ 分别为 4 行新疆杨, 5 行新疆杨, 1 行胡杨 + 2 行新疆杨。下同。

图 1 不同配置防护林内农田土壤含水率随防护林距离的变化

Fig.1 Variations in soil moisture content with distance of field shelterbelts for different configurations

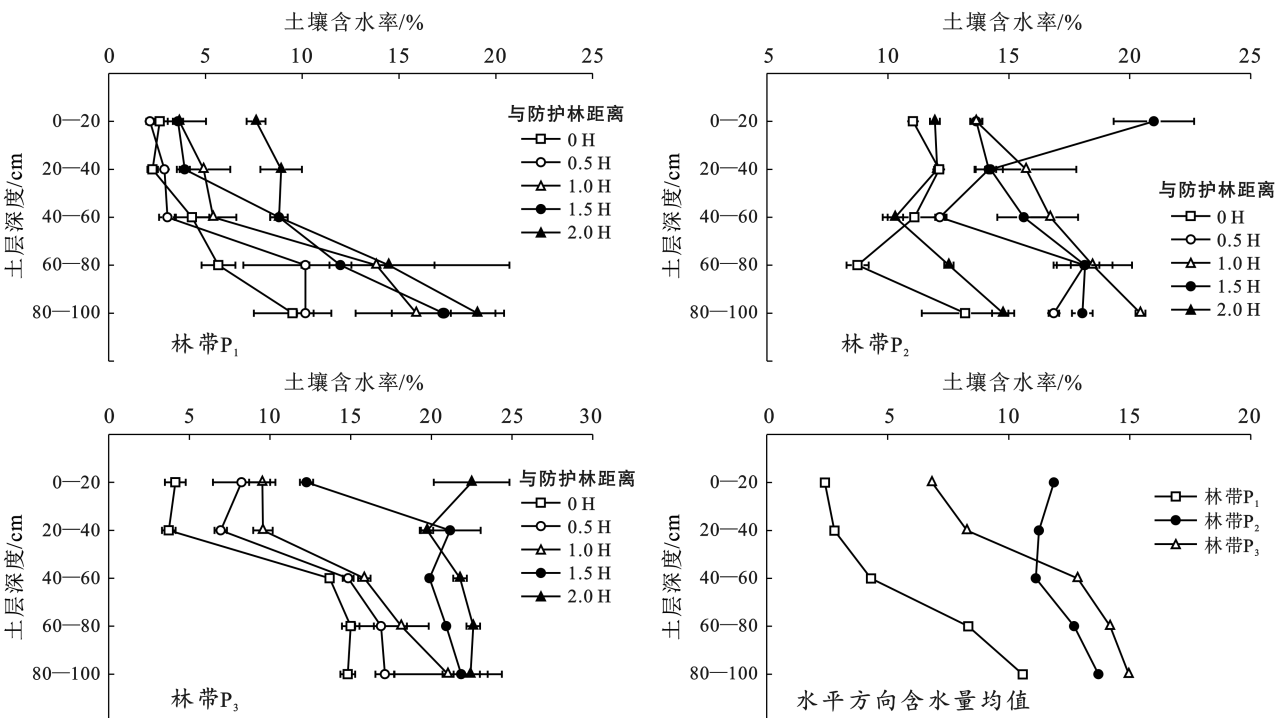


图 2 土壤含水率随土层深度的变化

Fig.2 Variations in soil moisture content with soil depth

2.1.3 土壤容重 由图 3 可知, P_1 林带防护的农田土壤容重随着土层深度的增加呈“先降后升”趋势, 且在 20—40 cm 土壤容重最小, 为 1.34 g/cm^3 , 80—100 cm 处容重最大, 为 1.63 g/cm^3 。 P_2, P_3 林带防护的农田土壤容重随土层深度的增加逐渐下降, 各土层间变化差异不显著。

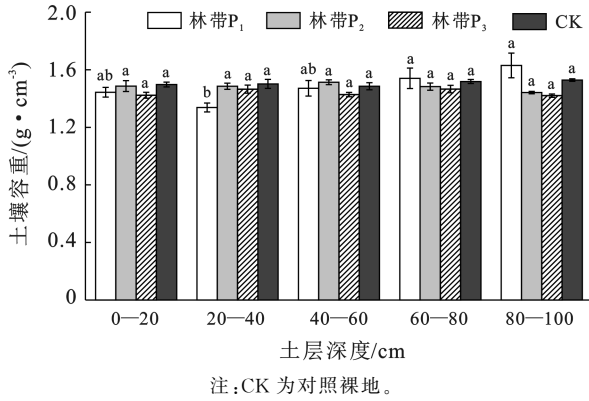


图 3 不同配置防护林内农田土壤容重变化

Fig.3 Variations in soil bulk density within farmland for different configurations of shelterbelts

2.2 农田防护林防护效果分析

2.2.1 防风效能 3 个试验样地中 林带 P_1 属于通风型林带结构(疏透度大于 60%)；林带 P_2, P_3 属于疏透型结构(疏透度 30%~50%)。从图 4 和表 2 可知, 不同林带后水平方向上风速整体呈现先减小后增加的趋势, 通风型林带 P_1 在水平方向上对风速的减缓效果较小。与裸地相比, P_1 林带在 0.5 H 处防风能力最强, 为 69.47%。 P_2, P_3 两种疏透型林带背风面风速衰减十分显著, 防护距离较长; 林带背风面防风效能变化规律基本一致, 均呈“先升后降”的趋势, 且 1.5 H 处的风速降幅最大, 1.5 H 到 2 H 随着与林带距离的增加, 风速逐渐增大。在林带背风面同一水平距离处, 0 H 处的防风效能表现为: $P_2 > P_1 > P_3$; 0.5 H, 1.0 H; 1.5 H 和 2.0 H 处的表现为: $P_2 > P_3 > P_1$ 。从各林带防风效能在垂直高度上的变化来看, 除 P_2 在 0.5 m 高度处稍有增加外, 总体上表现为随高度升高而减小的趋势; 疏透结构林带 P_2, P_3 与通风结构林带 P_1 背风面 0.2~0.5 m 高处平均防风效率最佳, 表现为: $P_2 (82.7\%) > P_3 (72.64\%) > P_1 (66.02\%)$ 。

表 2 不同配置防护林的防风效能

Table 2 Wind protection efficiency of different shelterbelt configurations

防护林配置	观测高度/ m	与防护林距离					平均
		0 H	0.5 H	1.0 H	1.5 H	2.0 H	
4 行新疆杨	0.2	70.06	74.07	63.89	62.65	60.19	66.17
	0.5	73.35	79.16	66.75	56.20	53.83	65.86
	1	60.10	64.13	54.63	49.41	38.95	53.44
	1.5	65.82	60.51	51.28	45.19	41.26	52.81
	平均	67.33	69.47	59.14	53.36	48.56	59.57
5 行新疆杨	0.2	75.93	90.43	93.83	83.33	68.21	82.35
	0.5	81.00	89.71	91.82	85.49	67.28	83.06
	1	68.65	85.99	82.66	75.30	64.61	75.44
	1.5	68.96	81.53	78.78	76.03	65.42	74.15
	平均	73.63	86.92	86.77	80.04	66.38	78.75
1 行胡杨+2 行新疆杨	0.2	76.23	79.32	82.10	68.83	61.11	73.52
	0.5	68.07	81.27	82.06	65.70	61.74	71.77
	1	52.97	67.93	69.36	52.26	43.94	57.29
	1.5	57.56	72.30	73.08	54.81	45.19	60.59
	平均	63.71	75.20	76.65	60.40	53.00	65.79

2.2.2 光照强度 由于防护林的遮蔽作用, 能有效减小太阳辐射, 使光照强度(SR)降低。由图 5 可知, 农田内光照强度均小于裸地, 且防护林 P_2 的农田内的光照强度最低, 水平距离上光照强度的平均值为 60.107 Lx , 较防护林 P_1, P_3 的农田内光照强度分别低 1.54% 和 5.04%。在水平方向上, 随着与防护林距离

的增加, 3 种配置防护林内光照强度总体呈现出逐渐上升的趋势, 在 0~1.0 H 范围内增幅最大, 1.0~2.0 H 范围内上升较为平缓。

2.2.3 温湿度 防护林具有明显的降温增湿作用, 不同配置的防护林对农田内温湿度的影响也不同, 在一天中不同时间, 由于光照强度和太阳辐射能量的变

化,林网内的温度和相对湿度也会发生相应的变化。由图 6 可知,10:00 时,各林带 0 H 的气温(T_a)均低于裸地,空气相对湿度(RH)均高于裸地,随林带距离的增加,林带 P_1 和 P_3 内 T_a 逐渐升高,RH 逐渐降低。林带 P_2 内 T_a 除了在 0.5~1.0 H 处下降外, T_a 则随着林带距离的增加呈“先降后升”趋势,在 1 H 处最低。15:00 时,由于光照强度和太阳辐射能量的增强,林内 T_a 和 RH 会发生一定的改变。3 种配置的防护林内 T_a 均呈“先降后升”趋势,在 0.5 H 处 P_1 和 P_3 的 T_a 值最低, P_2 在 1 H 处出现最小值,RH 则与之相反。20:00 时,林带 P_2 内 T_a 在 0~2.0 H 范围内呈现先升后下降的变化趋势,林带 P_1, P_3 均呈现下降趋势,且变化幅度较大,其中 P_3 的变化最明显。林带 P_1 和 P_2 内的 RH 在 0~0.5 H 呈下降趋势,在 0.5~2.0 H 逐渐上升,林带 P_3 内 RH 则随着与林带距离增加呈持续上升趋势,且 0.5~1.0 H 上升幅度最大。总体来看林带 P_1 和 P_3 在 0.5 H 处对田间降温增湿作用最大, T_a 较对照减少了 21.7% 和 14.9%,RH 较对照增加了 36% 和 28%, P_2 林带在 1 H 处的作用最明显, T_a 较对照减少了 16%,RH 较对照增加 25%。

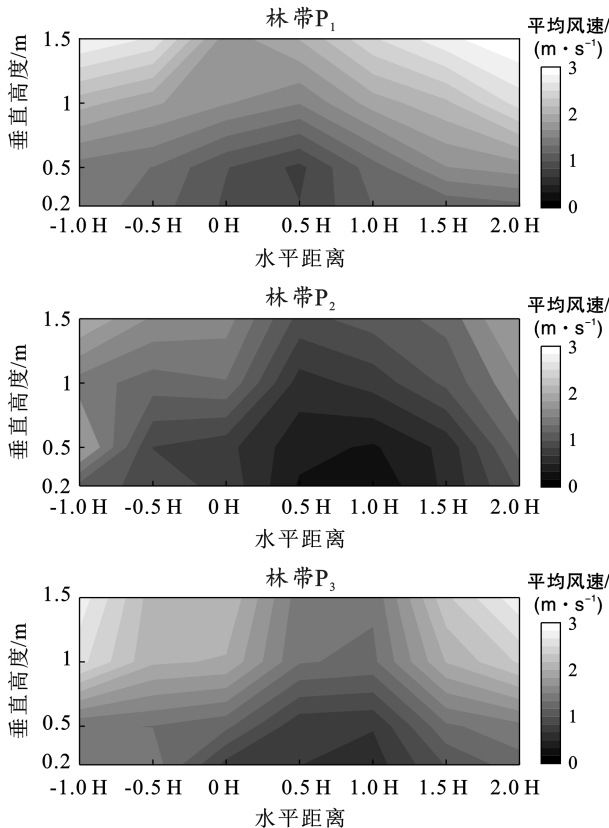


图 4 林带风速分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of wind speed within shelterbelts

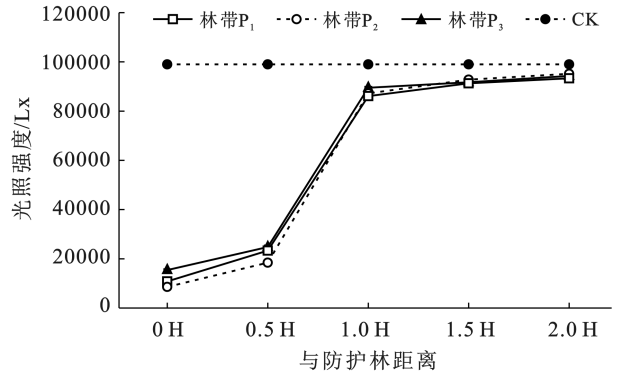


图 5 3 种配置防护林农田内光照强度变化

Fig.5 Variations in light intensity within farmland for three different configurations of shelterbelts

2.3 农田土壤水分影响因子分析

分别对三条林带内土壤含水率(Y)及其影响因素:土层深度(X_1)、风速(X_2)、温度(X_3)、湿度(X_4)、土壤容重(X_5)、光照强度(X_6)、与防护林距离(X_7)、林带疏透度(X_8)共 9 个指标进行皮尔逊(Pearson)相关性分析。各变量与土壤含水率存在着不同程度的相关性。林带 P_1 的温度(X_3)、湿度(X_4)与土壤含水率差异不显著; P_2 的土壤容重(X_5)、防护林距离(X_7)与土壤含水率差异不显著; P_3 的风速(X_2)与土壤含水率关系不显著,其余因子均与土壤含水率(Y)呈显著($p < 0.01$)或极显著($p < 0.001$)相关关系。

为了找到土壤含水率的主要影响因子,可以分别对三条林带除不显著因子外的其余变量进行主成分分析。如图 7 所示,林带 P_2 的土层深度(X_1)在第一主成分和第二主成分上的旋转成分载荷均为零,其余各因子的因子载荷和特征向量都较大,因此通过主成分分析将 P_2 原来的 5 个变量缩减为 4 个。其余各林带因子的因子载荷和特征向量都较大,变量不缩减。

2.4 逐步回归分析

通过主成分分析,对上述各林带影响土壤含水率的因子与土壤含水率 Y 进行逐步回归分析,建立回归方程(详见表 3)。对所建立的方程进行显著性检验,显著性水平 $p < 0.01$,方程检验均显著。一般来说, Durbin-Watson 检验值分布在 0~4 之间,越接近 2,观测值相互独立的可能性越大。即,本研究中简单线性回归的观测值具有相互独立性,证明方程均具有统计学意义。

2.5 通径分析

由于各因子对土壤含水率的影响存在密切的配合关系,为揭示其相关关系,明确各因子对土壤含水率的影响大小,需要对逐步回归筛选出来的变量与含水率(Y)进行通径分析。

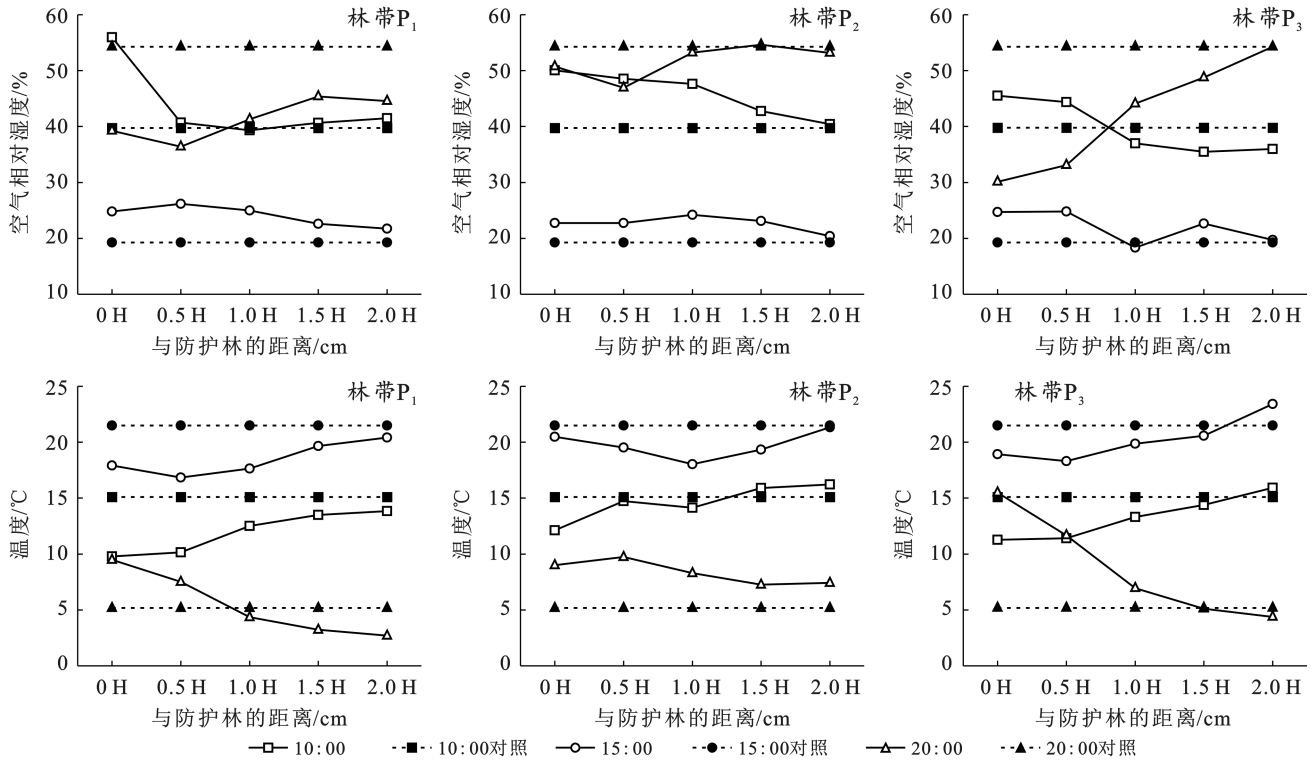


图 6 防护林内农田温度、湿度变化特征

Fig.6 Characteristics of temperature and humidity variations in farmland within protective forest

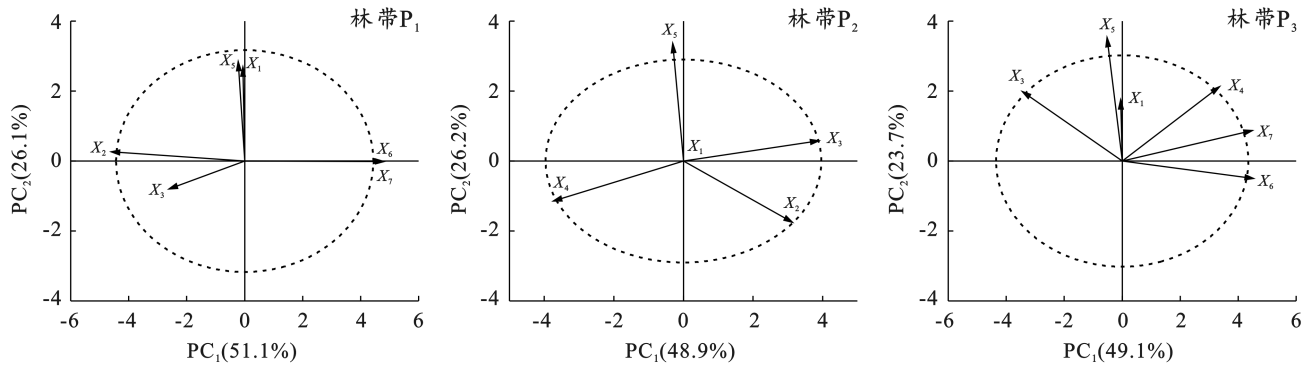


图 7 土壤含水率影响因子的 PCA 分析

Fig.7 Principal component analysis (PCA) of factors influencing soil moisture content

表 3 土壤含水率影响因子回归方程

Table 3 Regression equations for factors influencing soil moisture content

样地	回归方程	R^2	p	Durbin-Watson
林带 P ₁	$Y = -1.152 + 0.787 X_1 + 0.492 X_7$	0.848	<0.01	1.764
林带 P ₂	$Y = 9.213 + 1.745 X_6 + 8.484 X_4 + 8.025 X_3$	0.484	<0.01	0.891
林带 P ₃	$Y = -2.934 + 0.754 X_7 + 0.503 X_1$	0.805	<0.01	1.906
总体	$Y = -2.212 - 0.54 X_8 + 0.432 X_1 - 0.427 X_5$	0.660	<0.01	1.116

由表 4 可以看出, P₁ 的防护林距离 (X₇) 土层深度 (X₁) 对土壤含水率的直接通径系数绝对值大小分别为 0.492 和 0.778 7, 因此认为林带距离和土层深度均对土壤含水率有直接相关关系, 同时土壤容重通过

土层深度对土壤含水率有间接负相关关系; P₂ 的温度 (X₃)、湿度 (X₄)、光照强度 (X₆) 对土壤含水率的直接通径系数为 8.025, 8.484 和 1.745, 温度通过湿度对土壤含水率的间接通径系数较大为 -8.314, 因此认

为温度通过湿度对土壤含水率有间接的负作用; P_3 的防护林距离 (X_7)、土层深度 (X_1)、土壤容重 (X_5)、光照强度 (X_6) 对土壤含水率的直接通径系数分别为 0.423, 0.457, 0.191 和 0.122, 除光照强度 (X_6) 通过防护林距离 (X_7) 对土壤含水率的间接通径系数较大外其余间接通径系数均较小; 总体来看林带疏透度 (X_8) 与土壤含水率 (Y) 存在较大的负直接相关关系

(-0.541), 土层深度 (X_1) 与土壤含水率的正相关性较大, 表明随着土层深度的增加, 土壤含水率逐渐增大。土壤容重 (X_5) 对土壤含水率的直接通径系数较小, 通过土层深度 (X_1) 对土壤含水率 (Y) 的间接相关关系较大 (-0.123), 证明土壤容重通过土层深度对土壤含水率产生负向的间接影响, 因此当土层深度增加时这种负效应便会减小。

表 4 各因子与土壤含水率的通径分析

Table 4 Path analysis of factors influencing soil moisture content

林带	因子	与 Y 的简单相关系数	直接通径系数	间接通径系数							
				X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
P_1	X_7	0.47	0.492	—	—	—	—	-0.022	—	—	—
	X_1	0.75	0.787	—	—	—	—	-0.545	—	—	—
	X_3	-0.25	-8.025	—	—	—	7.904	—	0.374	—	—
P_2	X_4	0.22	8.484	—	—	-8.314	—	—	1.770	—	—
	X_6	0.35	1.745	—	—	0.082	-0.364	—	—	—	—
	X_7	0.74	0.423	0.000	—	—	—	0.012	0.382	—	—
P_3	X_1	0.5	0.457	—	—	—	—	0.096	0.000	0.000	—
	X_5	0.25	0.191	0.040	—	—	—	—	-0.028	0.005	—
	X_6	0.7	0.122	0.000	—	—	—	-0.018	—	0.110	—
	X_8	-0.53	-0.541	0.000	—	-0.445	—	0.059	-0.001	—	—
总体	X_1	0.42	0.383	—	—	—	—	-0.123	0.000	0.000	—
	X_5	-0.427	-0.122	0.122	—	—	—	—	-0.001	0.014	0.001

3 讨论

水平方向上, 3 种配置的防护林田间土壤含水率均在林缘处最低, Yao Yitong 等人^[25]认为杨树属树种会吸收浅层土壤水分进行蒸腾作用, 因此林缘附近土壤含水率最低。随着与防护林距离的增加, 除林带 P_2 的农田土壤含水率在 1.5 H 下降外, 其余林带各处含水率均随林带距离的增加而增加, 呈正相关关系。结合通径分析结果认为, 由于林带 P_2 空气温度与土壤含水率呈负相关关系, 且温度通过湿度对含水率有间接的负向影响, 在距林带 P_2 1.5~2.0 H 范围内, 空气温度显著升高, 湿度显著下降, 林带对风速的减缓作用骤降, 造成土壤水分蒸发, 导致土壤含水率下降。

垂直方向, 随土层深度的增加, 各林带农田土壤含水率均逐渐增大, 呈正相关关系, 且 60—100 cm 土壤含水率明显高于 0—60 cm 土层, 其中林带 P_1 内 0—60 cm 土层含水率最低。分析认为, 由于 P_1 为通风型林带, 疏透度大, 林带枝下存在较大的空隙, 对农田内部小气候改善作用不明显。土层深度较浅时, 无法抵消风速、光照强度、温度、林带疏透度等因子对土壤含水率的负作用, 导致水分散失严重, 当土层深度

增加时, 抵消了风速等因子对含水率的影响, 导致土壤含水率逐渐增加, 因此认为土层深度是林带 P_1 土壤含水率的主要影响因素。

林带 P_2 、 P_3 内的农田土壤容重均随着土层深度的增加而减小, 且容重值都低于裸地, 这可能由于裸地为免耕土, 在土壤自身重力作用以及降雨等外界因素影响下, 容重要高于翻耕过的土壤^[26], 且 3 种林带内种植的棉花均采用了覆膜措施, 有研究表明, 覆膜措施可以提高土壤保水能力, 同时降低浅层土壤的容重, 这也有助于减轻土壤结构的硬化和改善土壤通气性, 从而有利于作物生长^[27]。

3 种防护林配置的农田内部风速均随林带距离的增加呈现“先降后升”的变化趋势, 且 0 H 到 1.5 H 的风速降幅最大, 1.5 H 到 2.0 H 随着与林带距离的增加, 风速逐渐增加。总体来看, 各林带防风效果表现为: $P_2 > P_3 > P_1$, 林带疏透度越小, 在一定范围内林带对风速大的气流阻力大, 其防风效应也增大^[28], 这与段娜等^[29]人对乌兰布和沙漠几种结构配置的防护林防风效能研究结果相似。同时, 林带 P_2 在 0~1.0 H 范围内降温增湿的作用最明显, 防风效能与温湿度呈极显著正相关 ($p < 0.001$), 因此认为林带在距

林带 0~1.0 H 范围内 P_2 的小气候改善作用显著,但 1.0 H 后林带 P_2 的防护效益明显减弱,其有效防护距离小于 P_3 。

林带 P_1 , P_3 的农田土壤含水率主要受到土层深度和防护林距离的正向直接影响,因此土壤含水率随着土层深度和与防护林距离的增加而增加,且林带 P_3 土壤含水率大于 P_1 ; 林带 P_2 的农田含水率主要受温度、湿度、光照强度的直接影响,温度通过湿度对土壤含水率起到间接的负作用,王忠云等人^[30]探究了石漠化地区土壤含水率变化动态及影响因素,认为空气湿度和土壤温度共同影响土壤含水率,与本研究结果相似。总体来看三条林带内的农田含水率与林带疏透度、土层深度有较大的直接关系,土壤容重通过土层深度对含水率起间接作用。史薪钰等^[31]对太行山干旱区土壤含水率影响因子进行主成分分析,认为土层厚度、植被覆盖度、土壤容重均对土壤含水率有较大影响,与本研究结果相似。因此想要改善南疆地区农田土壤水资源匮乏问题还是要继续坚持防护林建设工作,保证防风固沙,确保农田水土保持。

4 结论

(1) 总体来看,水平方向上,林带疏透度对含水率有直接负向作用,疏透度为 62% 的 4 行新疆杨林内土壤含水率显著小于疏透度为 47% 的 1 行胡杨+2 行新疆杨林。垂直方向上,土壤含水率受到土层深度直接影响,深层含水率显著高于浅层。

(2) 5 行新疆杨林内土壤含水率受到空气相对湿度、光照强度的直接正向影响,受温度的间接负向影响。4 行新疆杨和 1 行胡杨+2 行新疆杨林内含水率受土层深度和防护林距离的共同作用。

(3) 林带防护距离在 0~1.5 H 间风速降幅最大,疏透度为 41% 的 5 行新疆杨林带防风效果最佳,0~1.0 H 林带遮荫作用最明显,表现为:5 行新疆杨林内光照强度<4 行新疆杨<1 行胡杨+2 行新疆杨,同时 5 行新疆杨对田间小气候改善范围在 0~1.0 H 间最显著。

(4) 综合认为 1 行胡杨+2 行新疆杨兼具防风、调节小气候效益,同时对土壤水分保持作用最显著,5 行新疆杨次之,因此,在防护林建设过程中可以考虑增加林带数量,种植混交林来更大程度地发挥农田防护林的作用。

参考文献 (References)

[1] 沈浩,吉力力·阿不都外力,玛纳斯河流域农田土壤水分空间分布特征及影响因素[J].应用生态学报,2015,26

(3):769-76.

Shen Hao, Jilibi Abuduwaili. Spatial distribution of soil moisture and salinity and their influence factors in the farmland of Manas River catchment, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 769-776.

[2] Mazurek R, Zaleski T. Shelterbelt as Factor Affecting Physical Properties of Adjacent Farmland Soils [C]. Beijing: Proceedings of the 2nd International Symposium of Soil Physics, 2017.

[3] Cheng Pengfei, Li Jie, Zhang Hongli, et al. Sustainable management behavior of farmland shelterbelt of farmers in ecologically fragile areas: Empirical evidence from Xinjiang, China [J]. Sustainability, 2023, 15(3): 2011.

[4] 张朝辉.干旱区农田林网生态工程的稳定性评价研究:基于新疆 Y 县的考察[J].干旱区资源与环境,2017,31(3): 107-12.

Zhang Zhaohui. Stability evaluation of ecological project of farmland shelterbelt network in arid area based on the investigation of Y County [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(3): 107-112.

[5] 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].安徽 合肥:安徽农业大学,2012.

Zhang Xintong. Study on the relationship between distribution of microclimatic factors and wheat yield in farmland shelter belt [D]. Hefei, Anhui: Anhui Agricultural University, 2012.

[6] 柏峰,王春华.农田防护林防护效益初探[J].干旱区研究,1989(4):51-56.

Bai Feng, Wang Chunhua. Farmland shelterforest, protection benefit [J]. Arid Zone Research, 1989(4): 51-56.

[7] 王雄.阿拉尔垦区农田防护林结构特征及其防护效益研究[D].新疆 阿拉尔:塔里木大学,2020.

Wang Xiong. Study on the structural characteristics and protection benefits of farmland shelter forest in Alar reclamation areas [D]. Alar, Xingjiang: Tarim University, 2020.

[8] 聂哲.区域尺度农田防护林的气候效应及对农作物增产机制的研究[D].辽宁 沈阳:沈阳农业大学,2020.

Nie Zhe. Study on the climate effect and crop yield increase mechanism of farmland shelterbelt at regional scale [D]. Shenyang, Liaoning: Shenyang Agricultural University, 2020.

[9] 王栋,肖辉杰,辛智鸣,等.不同配置农田防护林对田间土壤水分空间变异的影响[J].水土保持学报,2020,34(5): 223-30.

Wang Dong, Xiao Huijie, Xin Zhiming, et al. Effects of different configurations of farmland shelterbelt system on spatial variation of soil moisture content [J]. Journal

- of Soil and Water Conservation, 2020,34(5):223-230.
- [10] 刘丽霞.绿洲农田防护林系统水分生态特征研究[D].甘肃兰州:甘肃农业大学,2007.
Liu Lixia. Study on the water ecology characteristics of farm-shelter forest system in oasis [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2007.
- [11] 刘宏伟,高菲,余钟波,等.湿润地区坡面土壤含水率时空变异性研究[J].水资源保护,2016,32(5):17-23.
Liu Hongwei, Gao Fei, Yu Zhongbo, et al. Study on temporal-spatial variability of soil moisture content on hillslope in a humid area [J]. Water Resources Protection, 2016,32(5):17-23.
- [12] 张志华,郭加伟,桑玉强,等.太行山南麓鱼鳞坑工程对坡面土壤水分空间变异性的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(9):85-92.
Zhang Zhihua, Guo Jiawei, Sang Yuqiang, et al. Spatial variation in soil water content over hillslopes engineered by fish-scale pits in Taihang Mountainous region [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021,40(9):85-92.
- [13] 秦京涛,吕谋超,邓忠,等.豫北砂质壤土地区不同尺度农田土壤含水率空间变异性研究[J].灌溉排水学报,2019,38(7):10-16.
Qin Jingtao, Lyu Mouchao, Deng Zhong, et al. Spatial variability of soil moisture at different scales in sandy loam in Northern Henan Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(7):10-16.
- [14] 赵亚丽,王云强,张兴昌.黄土高原生态工程区土壤容重及饱和导水率的分布特征[J].农业工程学报,2020,36(10):83-89.
Zhao Yali, Wang Yunqiang, Zhang Xingchang. Distribution characteristics of bulk density and saturated hydraulic conductivity in intensive land restoration project areas on the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10):83-89.
- [15] Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M, Albaladejo J, et al. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments [J]. Journal of Hydrology, 2001,253(1/2/3/4):211-226.
- [16] 高福奎,王璐,李小刚,等.不同灌溉制度对南疆棉田水盐分布及作物生长的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(1):54-63.
Gao Fukui, Wang Lu, Li Xiaogang, et al. Effects of spring irrigation on water and salt distribution in soil and cotton growth in Southern Xinjiang [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023,42(1):54-63.
- [17] 檀博轩.基于 landsat_8 卫星影像数据的红枣种植面积估算研究:以新疆阿拉尔地区为例[J].科技资讯,2020,18(14):56-61.
Tan Boxuan. Estimation of jujube plantation area based on Landsat-8 satellite image data: A case study in Alar, Xinjiang [J]. Science & Technology Information, 2020,18(14):56-61.
- [18] 第一师阿拉尔市人民政府.气候条件:第一师阿拉尔市属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候 [EB/OL].(2023-10-1) [2023-10-15]. <http://www.ale.gov.cn/ssgk/qhtj>.
The First Division Aral City People's Government. Climate Conditions: The First Division Aral City falls under a warm temperate continental arid desert climate [EB/OL]. (2023-10-01) [2023-10-15]. <http://www.ale.gov.cn/ssgk/qhtj>.
- [19] 吴琼.南疆苦咸水可利用量评价:以阿拉尔市为例[D].新疆乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.
Wu Qiong. Evaluation of available brackish water in southern xinjiang: A case study in Alar area [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [20] 陈作州,张宇清,吴斌,等.农田防护林修枝对其附近光照强度及小麦产量的影响[J].麦类作物学报,2012,32(3):516-522.
Chen Zuozhou, Zhang Yuqing, Wu Bin, et al. Effect of shoot pruning on light intensity and wheat yield near farmland shelterbelt [J]. Journal of Triticeae Crops, 2012,32(3):516-522.
- [21] 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.
Guan Wenbin, Li Chunping, Li Shifeng, et al. Improvement and application of digitized measure on shelterbelt porosity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(6):651-657.
- [22] 李正农,周立凡.基于图像处理技术的树木疏透度确定方法研究[J].自然灾害学报,2022,31(5):175-182.
Li Zhengnong, Zhou Lifan. Research on the method of determining tree porosity based on image recognition technology [J]. Journal of Natural Disasters, 2022,31(5):175-182.
- [23] 吴依衍,马彬,姜艳.典型荒漠农田防护林对棉田土壤水盐动态的影响[J].新疆农业科学,2021,58(6):1012-1020.
Wu Yiyen, Ma Bin, Jiang Yan. Influence of typical desert farmland shelter forest on soil water and salt dynamics in cotton fields [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021,58(6):1012-1020.
- [24] 张克海.黑河中游不同景观类型的土壤水分动态研究[D].甘肃兰州:兰州交通大学,2020.
Zhang Kehai. Soil moisture dynamics of different landscape types in the middle reaches of Heihe River [D].

- Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [25] Yao Yitong, Wang Xuhui, Zeng Zhenzhong, et al. The effect of afforestation on soil moisture content in Northeastern China [J]. PLoS One, 2016, 11(8): e0160776.
- [26] 赵洪利, 李军, 贾志宽, 等. 不同耕作方式对黄土高原旱地麦田土壤物理性状的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 17-21.
- Zhao Hongli, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Effect of different tillages on soil physical properties of dryland wheat field in the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 17-21.
- [27] 张邦彦, 何文寿, 李惠霞, 等. 粉垄与覆膜对宁南旱区土壤物理性状及马铃薯产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 27-37.
- Zhang Bangyan, He Wenshou, Li Huixia, et al. Effects of deep vertically rotary tillage and film mulching on soil physical properties and potato yield in the arid area of Southern Ningxia [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 27-37.
- [28] 牛庆花, 彭博, 陆贵巧, 等. 河北省坝上地区牧场防护林的防风效能研究 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 114-117, 24.
- Niu Qinghua, Peng Bo, Lu Guiqiao, et al. Windbreak efficiency of pasture shelterbelt in Bashang area of Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 114-117, 24.
- [29] 段娜, 刘芳, 徐军, 等. 乌兰布和沙漠不同结构防护林带的防风效能 [J]. 科技导报, 2016, 34(18): 125-129.
- Duan Na, Liu Fang, Xu Jun, et al. On defending effects of different forest belt structures in Ulan Buh Desert [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18): 125-129.
- [30] 王忠云, 宋燕平, 喻阳华, 等. 石漠化地区土壤含水率的动态变化特征及其影响因素 [J]. 西南农业学报, 2021, 34(3): 591-596.
- Wang Zhongyun, Song Yanping, Yu Yanghua, et al. Dynamic change characteristics and influencing factors of soil moisture content in rocky desertification area [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(3): 591-596.
- [31] 史薪钰, 刘洋, 齐国辉, 等. 太行山片麻岩山地坡面土壤含水率及其影响因子: 以河北省阜平县为例 [J]. 林业资源管理, 2015(3): 114-120.
- Shi Xinyu, Liu Yang, Qi Guohui, et al. Study on soil moisture content and its impact factors in Taihangshan low gneiss mountainous area: Take Fuping Country Hebei Province as an example [J]. Forest Resources Management, 2015(3): 114-120.
- ~~~~~
- (上接第 10 页)
- [31] 周娜, 张春来, 田金鹭, 等. 半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征 [J]. 地理研究, 2014, 33(11): 2145-2156.
- Zhou Na, Zhang Chunlai, Tian Jinlu, et al. Flow field controlling the concave surface of the semi-buried checkerboards and its characterization by grain sizes of sediments [J]. Geographical Research, 2014, 33(11): 2145-2156.
- [32] 闫德仁, 杨制国, 高海燕, 等. 直压立式纱网沙障不同取样季节输沙量变化特征 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 129-134.
- Yan Deren, Yang Zhiguo, Gao Haiyan, et al. Variation characteristics of sediment transport for a vertical gauze sand barrier during different sampling seasons [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 129-134.
- [33] 方海燕, 屈建军, 俎瑞平, 等. 防沙工程的结皮效应研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 17-20.
- Fang Haiyan, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Research on effect of sand prevention and control engineering on formation of physical crust [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 17-20.
- [34] 虞毅. 沙袋沙障防沙治沙技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Yu Yi. Sandbag Sand Barrier Sand Prevention and Control Technology [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [35] 袁立敏, 黄海广, 闫德仁, 等. 不同沙埋程度下带状沙障的防风固沙效果研究 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 172-179.
- Yuan Limin, Huang Haiguang, Yan Deren, et al. Effect of wind-preventing and sand fixation of belt sand barrier under different degree of sand burial [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 172-179.