

且末绿洲沙漠过渡带防护林工程小气候效应研究

杨兴虎^{1,2}, 范敬龙¹, 徐新文¹, 黄媛^{1,2}, 马景永³, 席霞³

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 甘肃农业大学, 兰州 730070)

摘 要:为了探讨沙漠绿洲过渡带不同林龄的防护林对区域内小气候的影响,揭示风速、温度、湿度等气象要素的时空变化规律,针对且末绿洲边缘区块状防护林生态屏障,设置了 5 个观测点,采用小型自动气象站对防护林区和裸露流沙区的风速、空气温度、湿度进行连续同步观测。结果表明:(1) 相对裸露流沙地,梭梭林(2 a, 5 a, 7 a 林龄), 17 a 林龄混交林防风效能分别为 5.26%, 31.57%, 42.10%, 78.94%。混交林(17 a)的防风效能显著高于梭梭林(2 a, 5 a, 7 a 林龄),但各防护林防风效能随着风速的增大有所下降。(2) 防护林可以降低区域内的日均气温,且林龄越大,降温效果越明显;但达到一定年限后,降温效应不再增强。(3) 夜晚裸露流沙区气温高于防护林区,白天混交林(17 a)区气温显著高于裸露流沙区。(4) 防护林可以增加空气湿度,林龄越大,增湿效应越强,防护林区夜晚的增湿效应高于白天。

关键词:防护林工程; 小气候效应; 绿洲沙漠过渡带; 塔克拉玛干沙漠南缘; 且末

中图分类号: P463.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)05-0183-05

Research on Microclimate Effects of Shelterbelt Project in the Oasis Desert Ecotone of Qiemu

YANG Xinghu^{1,2}, FAN Jinglong¹, XU Xinwen¹, HUANG Yuan^{1,2}, MA Jingyong³, XI Xia³

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different desert oasis Ecotone shelterbelt forest age on microclimate within the region, reveal the spatial and temporal variation of wind speed, temperature, humidity and other weather elements for Qiemu Oasis protection forest ecological barrier blocks the peripheral zone, we set up five observation points to monitor the wind speed, air temperature, humidity in a small automatic weather station on the shelterbelt area and exposed quicksand area. The results showed that: (1) compared with bare quicksand, the windproof efficacy of *Haloxylon ammodendron* forests (forest ages of 2-year, 5-year and 7-year) and 17-year mixed forest were 5.26%, 31.57%, 42.10%, 78.94%. Mixed (17-year) of the draft efficacy was significantly higher than *Haloxylon ammodendron* forests (ages of 2-year, 5-year and 7-year), but as the wind speed increases the effectiveness of wind has declined; (2) the shelterbelt can reduce the average daily temperature in the region, and the greater forest age is the more obvious cooling effect is, but after reaching a certain age, the cooling effect no longer enhanced; (3) night temperature of shelterbelt area is greater than that of the bare sand area, daytime temperature of mixed (17-year) zone is significantly higher than that of the bare sand area; (4) the shelterbelt can increase air humidity, the greater the forest age is, the stronger humidifying effect is, moist effect at night in protection forest area is higher than that in the daytime.

Keywords: shelterbelt project; microclimate effect; oasis desert ecotone; southern edge of the Taklimakan Desert; Qiemu

小气候通常表征相同大气候和局地气候范围内,由于地形、土壤和植被等下垫面构造和特性的差异,引起水热收支不同,而形成的近地层特殊气候现象^[1]。人工建立的防护林能够有效改变下垫面性质,

从而影响区域小气候,近年来,防护林对小气候的改善作用,已被人们所公认^[2]。防护林可以增加地表粗糙度,改变贴地层气流运动,从而降低风速^[3-4],在荒漠流沙区域,风速的降低,减小了风对地表沙物质的

收稿日期: 2015-08-28

修回日期: 2015-09-28

资助项目: 国家科技惠民计划项目“新疆且末县河东经济型生态屏障示范工程建设”(2013GS650203)

第一作者: 杨兴虎(1987—),男,甘肃武威人,硕士研究生,研究方向为荒漠化防治。E-mail: 429726240@qq.com

通信作者: 徐新文(1963—),男,山东菏泽人,研究员,博士生导师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: sms@ms.xjb.ac.cn

搬运能力,可以减缓沙丘移动,减轻沙尘灾害。防护林可以改变区域内的温湿度,防护林对其所在区域具有缩小气温日较差、降低气温的作用^[5-7]。有研究表明,流沙地的气温在夜间要显著高于林地^[3],早晨柠条林的气温显著低于流动沙丘,中午柠条林的气温显著高于流动沙丘^[8]。也有研究认为,白天防护林内气温比林外低,而在晚上林内气温比林外高^[9-11],这也许是防护林所处区域的下垫面性质差异所致,也可能是防护林类型的不同引起的差异。防护林能够有效增加空气湿度,人工防护林内的相对湿度均显著高于荒漠流沙区^[12],研究发现,空气温度最大值出现的时刻空气湿度达到最小值,即空气温度、湿度呈现出明显的负相关性^[13-14]。

本研究的目的在于:针对且末绿洲边缘区块状防护林生态屏障,研究防护林系统的小气候效应,分析不同林龄防护林地小气候效应的差异,揭示风速、温度、湿度等气象要素的时空变化规律。防护林对小气候的影响因素主要有林种、配置结构、林龄等,当前众多的研究都集中于对防护林不同林种以及不同配置结构的研究^[15-17]。由于干旱区防护林体系一般是交通干线、河流明渠两侧的线性防护工程。而对于沙漠绿洲外围的大规模区块状防护工程,研究程度相对较低,相关的小气候效应研究相对欠缺。因此,对于这类绿洲核心区的外围防护体系的深入研究,对改善绿洲环境,发展绿洲可持续生态文明,都具有重要的研究价值。

1 研究区概况

在近代气候极端干旱、少雨多大风、沙尘频发的荒漠环境中,人类文明是扎根绿洲而逐步发展的。且末绿洲位于塔克拉玛干沙漠南缘(图 1),是依靠车尔臣河和昆仑山南坡诸小河发展起来的,也是塔里木盆地南部较大的绿洲之一,地处东经 83°25′—87°30′,北纬 35°40′—40°10′,属典型的大陆荒漠性气候,主风向为 NE,春夏季多大风、沙尘暴和浮尘天气,据当

地气象资料,年平均 8 级以上大风 16 d,沙尘暴天气 20.5 d,浮尘天气 193.7 d;年均降水量 18.6 mm,年均潜在蒸发量 2 507 mm;年平均气温 11.7℃,年极端最高温度 41.3℃,极端最低温度-26.4℃,全年无霜期 243 d,全年日照时数为 2 853.2 h。

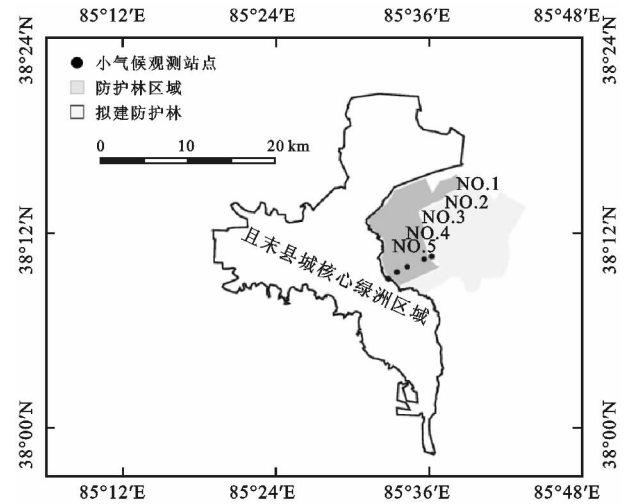


图 1 研究区地理位置与观测断面布设

由于风沙地貌发展和历史沿革,且末绿洲核心区的人类聚居地,距离流动沙漠最近距离仅有 1 km,因此且末县是新疆最早自发投入、义务建设过渡带防护林生态工程的县城之一。防护林直接营造在流动沙漠上,整个防护林体系历经十多年的不断建设,由绿洲边缘向流动沙区不断延伸,目前已营造防护林面积达 33.35 km² 左右。林分以梭梭(*Haloxylon* Bge.)、怪柳(*Tamarix* L.)、沙拐枣(*Calligonum* L.)、胡杨(*Populus euphratica*)为主。

2 试验材料与方法

在且末绿洲沙漠过渡带防护林工程区域选择一个观测断面进行小气候观测,断面布设情况见图 1,断面长度约 5.8 km,在前沿裸露流沙地设置观测对照点 1 个,在梭梭林(2,5,7 a)和混交林(17 a)依次分别设置观测点各 1 个,共计 5 个观测点,基本情况见表 1。

表 1 观测点基本属性

编号	样地类型	地理坐标	林龄/a	株高/cm	冠幅/(cm×cm)	样本/株
No. 1	流沙地	38°10′30.84″N,85°35′59.83″E	0	—	—	—
No. 2	梭梭林 1	38°10′22.27″N,85°35′36.23″E	2	81	91×84	20
No. 3	梭梭林 2	38°9′54.13″N,85°34′17.13″E	5	135	147×135	20
No. 4	梭梭林 3	38°9′34.27″N,85°33′29.25″E	7	192	198×195	20
No. 5	沙拐枣	38°9′9.61″N,85°32′48.66″E	17	279	232×231	10
	混交林	38°9′9.61″N,85°32′48.66″E	17	254	179×209	10
	胡杨	38°9′9.61″N,85°32′48.66″E	17	425	244×242	10

在 2015 年 5 月 1—26 日进行连续同步观测,仪器采用 YGY-QXY 小型气象站,该仪器由武汉市易谷科技有限公司研制。在国产气象仪器中,该仪器具

有便携性强,安装简便,性价比高,数据存储量较大的特点,观测精度为:风速,±0.3 m/s;温度,±0.3℃;湿度,±5% RH。本次观测项目包括风速、空气温

度、空气湿度,仪器安装距离地面 1.5 m 高度处,采样时间间隔设定为 5 min,即每个记录数据为 5 min 内该观测项目的平均值。

数据图表分析采用 Excel(Microsoft,V2010),方差分析采用 SPSS(IBM,V16)进行。

3 结果与分析

3.1 防护林区与裸露流沙区风速变化特征

为了便于理解,下文采用林龄作为观测点标示,CK 代表裸露流动沙地。如图 2 所示,各观测时刻平均风速日变化表现为白天>夜晚,风速大小排序:CK>2 a>5 a>7 a>17 a,表现出随林龄增大,风速逐渐减弱的特点。

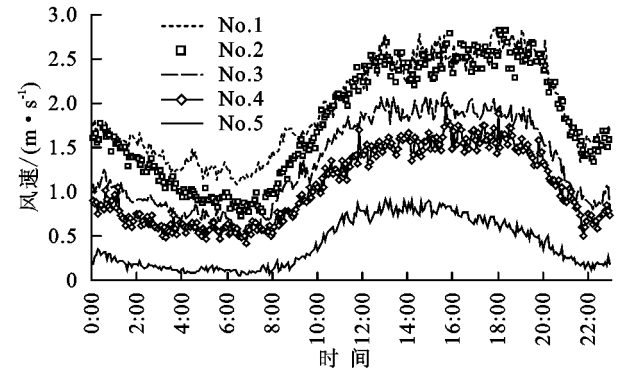


图2 各观测点风速日变化

为了进一步比较各防护林地之间的风速差异,进行了不同时段平均风速的方差分析。由表 2 可知,0:00—10:00 时段,各防护林地间风速差异均极显著($p<0.01$)。10:00—20:00 以及 20:00—24:00 两个风速较大的时段,CK 风速与 2 a 差异不显著($p>0.05$),而与 5 a, 7 a, 17 a 差异显著($p<0.05$)。这说明,在风速增大时,林龄较小的 2 a 防护林的防风效能有所下降。

表2 不同林龄防护林风速变化 m/s

林龄/a	0:00—10:00	10:00—20:00	20:00—24:00
CK	1.43±0.19a	2.42±0.28a	1.95±0.42a
2	1.16±0.27b	2.35±0.29a	1.92±0.43a
5	0.87±0.19c	1.83±0.20b	1.24±0.34b
7	0.66±0.13d	1.48±0.19c	0.98±0.29c
17	0.16±0.07e	0.70±0.14d	0.30±0.13d

注:表中均值后的英文字母表示多重比较(LSD)结果,字母不相同,则表示两处理之间在 $\alpha=0.05$ 水平上存在显著差异,下表同。

人工植被增加了下垫面粗糙度,在一定程度上削弱了近地面空气湍流交换作用的强度,可以降低近地表风速。如图 3 所示,1—5 号观测点风速逐渐减弱,日平均风速依次为:1.93,1.78,1.33,1.06,0.41 m/s,相对于 CK,2 a,5 a,7 a,17 a 防风效能分别为:5.26%,31.57%,42.10%,78.94%;最大日平均风速依次为:3.89,3.96,3.07,2.46,1.04 m/s,相对于 CK,2 a,5 a,7 a,17 a 防风效能分别为:0,20.50%,35.90%,74.36%。表明林龄越

大,防风效能越大,且随风速增大,防风效能有所下降。有相关研究也表明,防护林防风效能随着风速的变化而变化,防风效能会随风速增大而减弱^[3,18]。

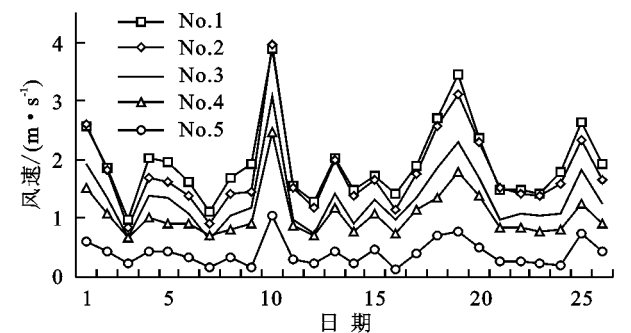


图3 2015年5月各观测点平均风速逐日变化

通过对各观测点日平均风速进行方差分析,由表 3 可知,风速大小排序:CK>2 a>5 a>7 a>17 a,CK 风速与 2 a 差异不显著($p>0.05$),CK 风速与 5 a,7 a,17 a 差异极显著($p<0.01$),2 a 风速与 5 a,7 a,17 a 差异极显著($p<0.01$),5 a 风速与 7 a 差异不显著($p>0.05$),17 a 风速与 2 a,5 a,7 a 差异极显著($p<0.01$),这表明,随着林龄的增大,防风效能也逐渐增强。

表3 不同林龄防护林风速和温湿度变化

林龄/a	风速均值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	温度 均值/ $^{\circ}\text{C}$	湿度 均值/%
CK	1.93±0.68a	24.69±2.99a	16.86±5.69c
2	1.78±0.69a	24.49±2.89a	20.58±7.54b
5	1.33±0.53b	24.20±2.87a	21.66±6.63b
7	1.06±0.40b	24.12±2.89a	23.64±6.41b
17	0.41±0.21c	24.12±2.74a	27.32±6.99a

3.2 防护林区与裸露流沙区空气温度变化特征

防护林和 CK 不同时刻气平均气温变化状况见图 4,林地与 CK 气温日内变化趋势基本一致,气温一般在 7:00 左右达到日内最低值,随着太阳辐射增强,气温逐步升高,在 16:00 左右气温达到日内最高值,之后,防护林与 CK 气温开始逐步下降。

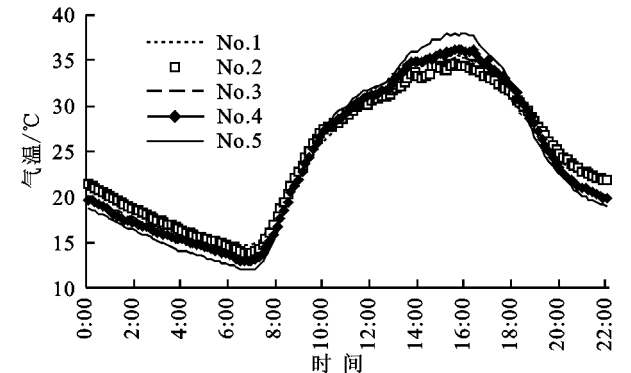


图4 各观测点空气温度日变化

林地气温与 CK 在白天和夜晚存在明显差异。通过对不同时段平均气温进行方差分析,由表 4 可知,0:00—8:00 时段,CK 气温与 2 a 差异不显著($p>0.05$),

CK 气温与 5 a, 7 a, 17 a 差异极显著($p<0.01$), 2 a 气温与 5 a, 7 a, 17 a 差异极显著($p<0.01$), 5 a 气温与 7 a 差异不显著($p>0.05$), 17 a 气温与 2 a, 5 a, 7 a 差异极显著($p<0.01$)。8:00—10:00 时段, CK 气温与 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 差异不显著($p>0.05$), 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 之间气温差异不显著($p>0.05$)。10:00—19:00 时段, CK 气温与 2 a, 5 a, 7 a 差异不显著($p>0.05$), CK 气温与 17 a 差异极显著($p<0.01$), 2 a, 5 a, 7 a 之间气温差异不显著($p>0.05$), 17 a 气温与 2 a, 5 a, 7 a 差异极显著($p<0.01$)。19:00—0:00 时段, CK 气温与 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 差异不显著($p>0.05$), 2 a 气温与 5 a, 7 a 差异不显著($p>0.05$), 2 a 气温与 17 a 差异显著($p<0.05$), 5 a, 7 a, 17 a 之间气温差异不显著($p>0.05$)。

贴地层空气温度的变化主要决定于下垫面辐射状况和湍流运动的变化^[19]。7 a, 17 a 防护林郁闭度较高, 对湍流运动影响较大, 当湍流运动成为决定空气温度的主导因素时, 7 a, 17 a 防护林相较 CK 能够显著影响湍流运动, 所以在 10:00—19:00 时段, 7 a, 17 a 林内气温高于 CK。2 a, 5 a 防护林郁闭度相对较低, 相较 CK 对湍流运动的影响较小, 下垫面辐射状况成为决定空气温度的主导因素, 2 a, 5 a 由于植被反射, 接受的辐射少于 CK, 所以 2 a, 5 a 防护林气温小于 CK。

表 4 不同林龄防护林空气温度变化 ℃				
林龄/a	0:00—8:00	8:00—10:00	10:00—19:00	19:00—0:00
CK	17.27±1.98a	19.32±2.42a	32.13±3.45b	25.28±3.18ab
2	16.96±2.26a	19.29±2.89a	31.45±2.74b	26.09±3.45a
5	16.10±2.01b	19.13±2.99a	32.02±3.04b	25.09±4.17ab
7	15.72±2.00b	18.35±2.98a	32.35±3.45b	25.13±4.51ab
17	14.74±2.08c	18.27±3.68a	33.55±3.74a	24.42±4.80b

如图 5 所示, 防护林地与 CK 的日平均气温变化趋势具有一致性, No. 1—No. 5 观测点日平均气温依次为: 24.69, 24.49, 24.20, 24.12, 24.12℃, 日平均气温大小排序: CK>2 a>5 a>7 a=17 a, 表明 CK 日平均气温均高于 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 防护林, 随林龄增大, 日平均气温降低, 由于 7 a 气温与 17 a 相同, 说明到达一定年限, 防护林降温效应不再增强。通过对日平均气温进行方差分析, 由表 3 可知, CK 气温与 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 差异不显著($p>0.05$), 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 之间气温差异不显著($p>0.05$), 表明, 防护林的降温效应是有限的。

3.3 防护林区与裸露流沙区空气湿度变化特征

如图 6 所示, CK 空气湿度与防护林区具有相似的日变化趋势, 24 h 内空气湿度在约 7:30 达到最大值, 约 17:00 达到最小值, 与温度的日变化呈反比关

系, 即温度最低时湿度最大, 温度最高时, 湿度最小。夜晚湿度>白天湿度, 并且 24 h 内各时刻 CK 的湿度始终低于防护林区。

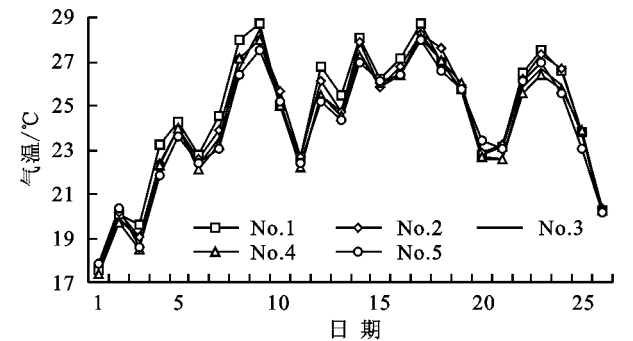


图 5 2015 年 5 月各观测点平均空气温度逐日变化

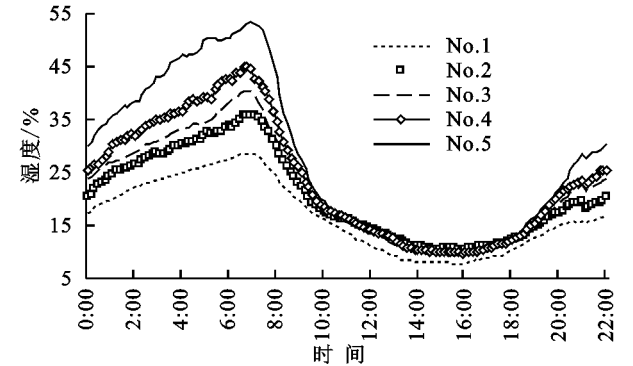


图 6 各观测点空气湿度日变化

通过对不同时段平均湿度进行方差分析, 由表 5 可知, 0:00—10:00 时段, 湿度较高, CK 湿度与 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 差异极显著($p<0.01$), 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 之间湿度差异极显著($p<0.01$)。10:00—20:00 时段, 湿度较低, CK 湿度与 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 差异极显著($p<0.01$), 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 之间湿度差异不显著($p>0.05$)。20:00—0:00 时段, CK 湿度与 2 a, 5 a, 7 a, 17 a 差异极显著($p<0.01$), 2 a 湿度与 5 a, 7 a, 17 a 差异极显著($p<0.01$), 5 a, 7 a 之间湿度差异不显著($p>0.05$), 17 a 湿度与 5 a, 7 a 差异极显著($p<0.01$)。表明防护林具有一定的增湿效应, 且这种增湿效应在夜晚比白天更加明显。

表 5 不同林龄防护林湿度变化 %			
林龄/a	0:00—10:00	10:00—20:00	20:00—0:00
CK	23.88±3.15e	10.63±3.01b	14.77±1.50d
2	29.09±4.20d	13.20±2.83a	17.42±2.08c
5	31.70±5.00c	12.43±2.98a	19.42±3.43b
7	35.33±5.75b	13.09±3.37a	20.63±3.66b
17	42.99±7.60a	13.14±3.89a	23.39±5.10a

由图 7 可知, 防护林的日平均空气湿度高于 CK, 1—5 号观测点的日平均空气湿度依次为: 16.86%, 20.58%, 21.66%, 23.64%, 27.32%, 湿度大小排序: CK<2 a<5 a<7 a<17 a。通过对湿度日平均值进行方差分析, 由表 3 可知, CK 湿度与 2 a, 5 a 差异显

著($p < 0.05$), CK 湿度与 7 a, 17 a 差异极显著($p < 0.01$), 2 a 湿度与 5 a, 7 a 差异不显著($p > 0.05$), 2 a 湿度与 17 a 差异极显著($p < 0.01$), 5 a, 7 a 之间湿度差异不显著($p > 0.05$), 17 a 湿度与 5 a, 7 a 差异极显著($p < 0.01$)。表明防护林内的空气湿度较 CK 有所增加, 比较不同林龄的防护林, 表现为林龄越大, 增湿效果越明显。

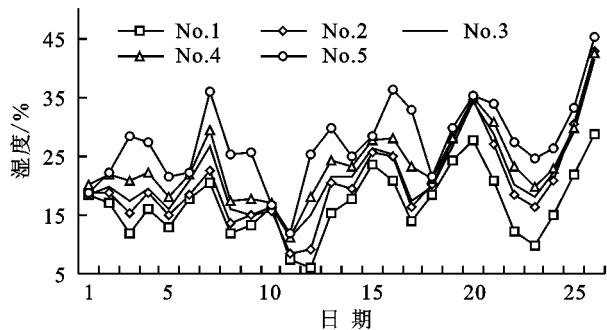


图7 2015年5月各观测点平均空气湿度逐日变化

4 结论

(1) 研究区风速日变化表现为白天>夜晚; 相对于裸露流动沙地, 梭梭林(2 a, 5 a, 7 a)、混交林(17 a)防风效能分别达到: 5.26%, 31.57%, 42.10%, 78.94%, 表明随林龄的增大, 其防风效能增强, 并且混交林(17 a)的防风效能显著高于梭梭林(2 a, 5 a, 7 a); 随着风速的增大, 防护林的防风效能有所下降。

(2) 防护林具有一定的降温效果, 并且林龄越大, 降温效果也越明显, 具体表现为: 流沙地>2 a 梭梭林>5 a 梭梭林>7 a 梭梭林=17 a 混交林, 当达到一定年限, 防护林的降温效应不再增强。

(3) 防护林可以有效增加空气湿度, 林龄越大, 增湿效应越明显。24 h 内空气湿度在 7:30 左右达到最大值, 17:00 左右接近最小值, 与温度的变化趋势相反; 林带内, 夜晚的增湿效应高于白天。

(4) 夜晚流沙地气温高于防护林地的现象, 有研究认为夜间植被区散热面积大, 散热快, 使贴地层气温稍低于流沙区^[20]。也有人认为沙漠地区风速加大, 机械湍流的混和作用加强, 在夜晚导致上层空气向下层传热加强, 即感热通量加强, 导致近地面温度变高^[21]。笔者认为, 夜晚研究区风速明显低于白天, 说明湍流运动并不强, 因而认为, 该现象是由下垫面辐射状况变化引起, 这与荒漠地区特殊下垫面性质密切相关。由于裸露流沙区地形变化较大, 太阳辐射面积大于平地, 接受的太阳辐射较高。白天, 太阳辐射被地表沙物质吸收并储存, 傍晚太阳辐射减弱, 储存在流沙地的大量能量逐步向外界释放, 造成日落后流沙地温度高于林地的现象。这些推论还需进一步的验证与探讨。

参考文献:

- [1] 周晓峰. 中国森林与生态环境[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [2] 王君厚, 周士威. 乌兰布和荒漠人工绿洲小气候效应研究[J]. 干旱区研究, 1998, 15(1): 27-34.
- [3] 王翠, 雷加强, 李生字, 等. 和田地区绿洲外围农田防护林带的防护效益[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 98-103.
- [4] 董慧龙. 低郁闭度乔木行带式固沙林防风效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [5] 王海峰, 雷加强, 李生字, 等. 塔里木沙漠公路防护林的温度和湿度效应研究[J]. 科学通报, 2009(S2): 33-42.
- [6] 刘海波. 新疆塔中石油基地绿化的小气候效应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2007.
- [7] Wang H, Hao Z. A simulation study on the eco-environmental effects of 3N Shelterbelt in North China[J]. Global & Planetary Change, 2003, 37(3/4): 231-246.
- [8] 朱雅娟, 李虹, 赵淑伶, 等. 共和盆地不同类型防护林的改善小气候效应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 841-848.
- [9] 马国飞, 崔学明, 刘静, 等. 两种杨树农田防护林气候效应的对比研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2005, 26(1): 42-45.
- [10] 常杰, 潘晓东. 青冈常绿阔叶林内的小气候特征[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 68-75.
- [11] 刘文杰, 张克映, 王昌命, 等. 西双版纳热带雨林干季林冠层雾露形成的小气候特征研究[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 486-491.
- [12] 宁虎森, 朱雅娟, 吉小敏, 等. 新疆精河县不同人工植被对小气候的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 64-68.
- [13] 徐丽萍, 杨改河, 姜艳, 等. 黄土高原人工植被小气候生态效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 163-167.
- [14] 毛东雷, 雷加强, 李生字, 等. 策勒绿洲—沙漠过渡带小气候的空间差异[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1501-1510.
- [15] 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.
- [16] 蒋丹丹, 万福绪, 黄文庆. 石灰岩山地两种模式人工林小气候比较[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 110-114.
- [17] 杨钙仁, 苏晓琳, 蔡德所, 等. 针阔混交林转为桉树林对森林小气候的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 129-134.
- [18] Zhang H, Brandle J R, Meyer G E, et al. The relationship between open windspeed and windspeed reduction in shelter[J]. Agroforestry Systems, 1995, 32(3): 297-311.
- [19] 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成. 小气候与农田小气候[J]. 北京: 农业出版社, 1981.
- [20] 刘树华, 陈荷生. 沙漠人工植被和流动沙丘的小气候特征观测研究[J]. 干旱区地理, 1994, 17(1): 16-23.
- [21] 潘林林, 陈家宜. 绿洲夜间“冷岛效应”的模拟研究[J]. 大气科学, 1997, 21(1): 39-48.