

极端干旱地区绿洲小气候特征及其生态意义

冯起, 司建华, 张艳武, 姚济敏, 刘蔚, 苏永红

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 运用微气象学方法对极端干旱区荒漠绿洲小气候进行了观测, 分析我国极端干旱区荒漠绿洲的微气象特征并与林地外进行了对比。同时讨论晴天、阴天和沙尘暴天气的 PAR 的差异, 分析了产生这些差异的原因。结果表明荒漠绿洲具有改变太阳辐射、调节近地层地表及地下温度、缩小温差、降低风速、提高土壤及大气湿度等重要生态作用。绿洲内部的太阳总辐射比林冠层顶部减少 49.3%~49.83%; 生长期胡杨和柽柳林内的气温均低于林地外, 胡杨林平均比林外低 1.62 °C, 柽柳林比林外低 0.83 °C, 而且森林覆盖率越高降温作用越明显; 群落上层气温高于群落下层, 气温随高度增加而增加; 林内大气相对湿度均高于林地外, 生长期, 胡杨林内比林地外高 8.5%, 柽柳林高 4.2%; 胡杨林地平均风速为 0.33 m/s, 比林地外低 2.7 m/s; 柽柳林平均风速为 0.72 m/s, 比林地外低 2.31 m/s。在沙尘暴日, PAR 明显小于阴天日和晴天日下的值, 而 η_Q 非常大, 且变化不稳定, 该结论对研究大气层的稳定性有极其重要的意义。

关键词: 极端干旱区; 荒漠绿洲; 光合有效辐射; 小气候; 黑河下游; 内蒙古

小气候是生物生长发育最重要的环境因子, 不同的植物群落形成不同的小气候环境, 而各异的小气候生境又构成了不同的生物群落^[1]。生物群落和其周围环境每时每刻都在进行物质和能量的交换, 森林的水热状况等气象要素既是这一交换的结果, 又构成这一交换的未来条件。一方面, 树木各组织器官的生长发育、光合蒸腾等生理活动受到生境微气象因子的限制。另一方面, 植被反映下垫面局部特征, 并通过辐射、蒸腾、屏障等作用, 影响近地面层的小气候特征, 调节系统内部水、热等小气候环境, 使系统产生热量平衡和水量平衡的差异。这些差异对人类的生活和生产活动十分重要^[2]。因此, 要协调生物与环境的关系, 离不开小气候的研究。森林小气候研究是国内外关注的研究领域^[3-9], 自 20 世纪初开始, 国外许多学者研究了多种森林群落的环境特征。我国学者近年来在温带阔叶林、针叶林以及南亚热带季风常绿阔叶林等生态系统中也做过研究工作^[10-12], 得出了一些有益的结果。但对极端干旱区植物群落小气候特征的研究报道并不多。

光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 是太阳辐射能中可以被绿色植物用来进行光合作用的能量, 波长在 400~700 nm 之间。PAR 是植物进行光合作用的重要环境因子之一, 也是植物生长所需的基本能源。许多科学家对此作过研究^[13-20]; 对 PAR 的研究已经引起了国内外许多学者的关注, 但对于沙尘暴天气下 PAR 特征的观测研究目前尚未见到。

荒漠河岸林作为干旱荒漠环境条件下的重要森林资源, 是西北干旱地区维持生态的天然屏障, 分布于荒漠河流两岸绿洲包括胡杨 (*Populus euphratica* Oliv.) 与其伴生的柽柳 (*Tamarix ramosissima*) 形成了荒漠生态系统, 作为干旱荒漠区的特殊区域, 与周围荒漠区合成一个相互作用、相互制约的系统^[21]。干旱区植物群落小气候和生态环境的研究将更好

收稿日期: 2005-06-20; 修订日期: 2005-11-17

基金项目: 中国科学院“百人计划”(2003401); 中国科学院知识创新项目(KZCX1-09-03; KZCX1-10-06) [Foundation: The Hundred Talent Scholar Foundation, No.2003401; Knowledge Innovation Project, No.KZCX1-09-03; No. KZCX1-10-06]

作者简介: 冯起(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, “百人计划”入选者, 主要从事水文学与水资源研究。

E-mail: qifeng@lzb.ac.cn

的阐明干旱区生态环境状况和环境因子影响生态环境的变化趋势^[22-25]，为了解极端干旱区植物群落的生态功能和估价其环境效益提供基础资料，为合理经营利用森林和营造人工林生态系统提供科学依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于黑河下游内蒙古额济纳地区，是中国最干旱的地区之一。具有降水稀少，蒸发强烈，风大沙多，日照时间长等特点。据额济纳旗气象站1957~2002年资料，多年平均降水量42mm，年最大为103mm，最小为7mm；多年平均潜在蒸发量为3755mm，最高达4035mm。蒸发量是降水量的89倍。降水多集中在每年的6~9月，约占全年降水量的70%~80%。荒漠绿洲主要植被为河流两岸的乔木胡杨和灌木柽柳为主。两种树种都具有耐盐碱、水湿，抗干旱、风沙，具有维护分布区内的生态平衡，保障绿洲农牧业生产和为居民生活提供用材等作用，具有较高的生态、经济和社会效益。

在2002年3月~2003年10月，进行对荒漠绿洲小气候梯度观测。胡杨林观测区位于额济纳旗达镇东南的七道桥胡杨林保护区内，距额济纳旗达来呼布镇（旗政府所在地）东20km处，地理坐标为42°21'N, 101°15'E，高程920.46m，面积1333hm²。林龄20~25年，属于幼林，郁闭度0.8，密度在500株/hm²、平均高10m左右，平均胸径12cm。林下有柽柳、苦豆子分布。土壤为胡杨林土，1.5m土壤质地粘壤土至砂土。0~30cm有机质含量0.724%，30~200cm为0.127%。地下水埋深在3.5~1.5m之间。柽柳林小气候观测区位于额济纳旗达镇东南的二道桥柽柳林内，地理坐标为41°58'N, 101°06'E。试验地是1988年作为牧业用地而围封起来的天然柽柳地，植被覆盖度为70%以上，1300丛/hm²，植株平均高度约2m，林龄在20年以上。母质为河流冲积物，土壤为柽柳林土，局部有硫酸盐盐斑，地下水埋深在2~3.5m左右。

本研究选取2002年4月28日分析沙尘暴天气下的PAR，并选择同年7月30日和9月6日分析阴天日及晴天日的PAR。对于PAR的日变化，本文分析3个个例。由于这3个个例的季节相差较大，所以分析结果与其他一些因子长期统计结果的代表性和意义不是一样的。

1.2 研究方法

本研究使用自动微气象站（澳大利亚ICT公司生产）和波文比观测系统（美国COMPELL公司生产），在样地内建立了6m高的气象观测架。主要观测项目有辐射（包括总辐射、净辐射、有效辐射）、空气温湿度、风速风向、土壤温度、土壤热通量、CO₂浓度。辐射探头架设高度为1.5m，空气温湿度探头分3层布设，林地以上1m、2m和4m处各布设一层。风速探头布设在1m、2m、3m、4m、6m处，在6m处加风向标。地温分地表下0cm、5cm、10cm、15cm、20cm、40cm六层布设，CO₂测定仪架设高度为1.5m和3.5m两层。两个土壤热通量板分别埋设在地表以下5cm和10cm处。所有观测项目的传感器以电缆同室内数据采集器相连，24小时全天候观测，自动数据采集器（Zeno3200-A-D）对以上观测项目每10min记录一次。林地外的数据来源于额济纳旗气象局2002~2003年气象资料。

2 结果分析

2.1 太阳辐射

生长季节，由于林冠对太阳直接辐射强烈削弱（吸收、反射），胡杨林和柽柳林冠层

表 1 额济纳旗胡杨和柽柳林地太阳辐射的月变化 (MJ·m⁻²)Tab. 1 Monthly variations of the solar radiation in *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* forests

林分	辐射项	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
胡杨林	总辐射	480.44	539.59	407.24	311.23	179.12	132.71	341.72
	光合有效辐射	353.17	385.52	328.72	212.26	141.22	108.22	254.85
	净辐射	208.70	242.56	191.61	58.57	41.99	33.97	129.57
柽柳林	总辐射	482.19	541.05	410.54	314.22	182.69	140.13	345.14
	光合有效辐射	280.25	312.18	256.53	182.69	106.22	81.47	203.22
	净辐射	85.48	91.81	72.55	77.29	134.55	69.50	88.53
林地外	总辐射	730.35	797.66	779.68	720.11	593.04	466.73	681.26

顶部的太阳总辐射量月平均为 $341.72 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $345.14 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 1)，月份最大分别为 $539.59 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $541.05 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，10 月份最小分别为 $132.71 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $140.13 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。同林地外相比，胡杨林和柽柳林冠层顶部的太阳总辐射量月平均分别只有林地外的 50.2%、50.7%，6 月份最大，分别为林地外的 67.7%、67.8%，最小为 10 月份，只有林地外的 28.4%、30.0%。太阳总辐射 6 月份最高，随时间的推移不断降低；柽柳林地太阳总辐射量各月均高于胡杨林地，生长季节平均高 $3.42 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

净辐射决定大气和群丛之间的辐射交换程度。在总辐射基本相同的情况下，胡杨和柽柳林地净辐射平均日总量差异十分明显，净辐射占总辐射的比例分别为 37.9%、25.7%。胡杨林地最高值出现在 5、6、7 月，占总辐射比例分别为 43.4%，45.0%，47.1% (表 1)。柽柳林地最高值出现在 9、10 月，占总辐射比例分别为 73.7%，49.6%。可以明显看出，夏季胡杨林地净辐射远远大于柽柳林地，秋季胡杨林地小于柽柳林地。

2.2 PAR 的基本特征

2.2.1 PAR 的日总量和最大时累计值 从表 2 中可以看出：① 该绿洲在沙尘暴天气下，无论 PAR 的日总量还是 Q 的日总量都明显小于晴天日和阴天日的，这主要是因为在沙尘暴天气下，空气中的颗粒物大量增加，使其对太阳辐射的吸收和散射作用明显增强，严重削弱了 PAR 和 Q 的量值；阴天日下的 PAR 和 Q 虽然大于沙尘暴天气下的，但也明显小于晴天日的，这是因为阴天日的云量和大气中的水汽含量较晴天日多，吸收和反射的太阳辐射也多；比较来看，沙尘暴对太阳辐射的削弱远远大于阴天日云和水汽的作用。② 虽然 PAR 和 Q 在晴天日下最大，阴天日次之，沙尘暴天气下最小，但是 η_Q (光合有效辐射 PAR 所占太阳总辐射比例) 却在沙尘暴天气下最大，为 56.5%，晴天日下最小，为 49.3%。2002 年 4 月 28 日，该绿洲的平均气温仅为 2.92°C ，大气的平均相对湿度为 80.4%，这是由于沙尘暴天气下很强的冷空气作用使气温骤然降低，并使大气中水汽凝结，相对湿度变大，红外辐射吸收增大，再加上沙尘对太阳辐射各波段的削弱作用，尤其在近红外波段范围内沙尘的吸收更强，造成在沙尘暴天气下 η_Q 值较大。阴天日的 η_Q 大于晴天日的是因为阴天日的云和水汽较晴天日多，使空气分子和气溶胶粒子对散射的

表 2 额济纳旗不同天气状况下的 PAR 日总量、Q 日总量及比例 η_Q *、平均气温和相对湿度Tab. 2 The daily PAR, daily short-wave irradiance (Q), their ratio η_Q , average air temperature and relative humidity under different weather conditions

	4月28日(沙尘暴)	7月30日(阴天)	9月6日(晴天)
PAR/MJ·m ⁻²	4.09	12.4	21.4
Q/MJ·m ⁻²	7.24	23.9	43.4
光合有效辐射 (PAR) 所占太阳总辐射比例 η_Q / %	56.5	51.9	49.3
平均气温 / °C	2.92	27.8	22.7
平均相对湿度 / %	80.4	30.8	22.5

贡献相对减少，并且加大了红外辐射的吸收^[26]，而阴天日气温较晴天日高是因为本文所研究的阴天日和晴天日分属夏、秋两季，夏季气温高于秋季所致^[13]，可见沙尘暴对PAR的削弱作用是很强的。

2.2.2 PAR的日变化对比 从沙尘暴日、典型晴天日和阴天日PAR日变化的对比中可以看出(图1): ① PAR与Q的日变化趋势基本一致。② 该地区晴天日PAR和Q都非常大，且与太阳高度角的变化密切相关，变化十分稳定，最大值出现在当地正午时分左右；阴天日和沙尘暴日PAR的变化很不稳定，这主要与各时刻的天气状况、天空云量及大气中水汽含量和沙尘含量等的变化有关，总的来说，晴天日的PAR和Q要明显大于阴天日和沙尘暴日的，且沙尘暴日PAR值为最小。③ 与其他地方相比，该区晴天日PAR的最大值要明显大于张掖、临泽地区的，日变幅也较大；而沙尘暴日PAR的日变幅很小，更进一步说明了沙尘暴天气对PAR的削弱作用非常大。

统计结果发现，晴天日下PAR与Q的线性趋势最明显，这是因为晴天日影响 η_Q 的因子较少，阴天日由于水汽、云等的作用使PAR与Q的线性趋势次于晴天日，沙尘暴日由于除了云、水汽之外还有沙尘的影响，致使这种趋势相对最弱，但总体来说，PAR和Q还是有很好的线性变化关系。

2.2.3 光合有效辐射(PAR)所占太阳总辐射比例(η_Q)的分析 影响 η_Q 的因子有很多，例如沙尘、云、水汽含量及太阳辐射强度等。从以往的研究^[13, 26]可以看出，在晴天日条件下， η_Q 的日变化是有规律性的。因为在沙尘暴日，各个时刻影响 η_Q 的因子的权重在变化，例如大气中沙尘的含量、水汽含量等由于沙尘暴日的大风及大气不稳定层结的影响会随时空不断地变化，使沙尘暴日 η_Q 变化较复杂。

从2002年4月28日沙尘暴天气下小时平均 η_Q 的日变化可以看出(图2): 在沙尘暴天气下 η_Q 总体非常大，且变化不稳定。需要指出的是：试验观测到在早晨7:00、8:00和9:00， η_Q 达到70%以上，比较罕见，可能是由于受4月28日沙尘暴天气影响，致使28日早晨的Q和PAR极为偏小，造成 η_Q 较偏大。主要是因为：① 沙尘暴天气下，太阳总辐射强度很小，季国良等^[26]研究得到，在临泽 η_Q 与太阳总辐射强度大致呈对数关系变化，C. M. Britton等^[14]也指出在Texas站， η_Q 随太阳辐射的增大而减小。因此太阳辐射强度是影响 η_Q 的因素之一，并且，在一定的太阳辐射范围内， η_Q 随太阳辐射强度的增加而减小。所以沙尘暴日的 η_Q 会偏大。② 如前所述，沙尘

图1 额济纳旗不同天气状况下PAR的日变化

Fig. 1 The diurnal variations of PAR in different weather conditions

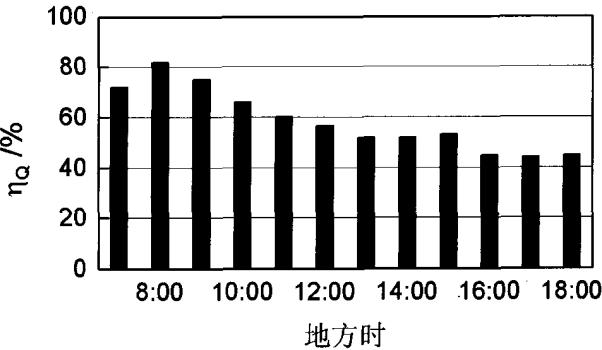


图2 额济纳旗沙尘暴日小时平均 η_Q 的日变化

Fig. 2 The daily variations of hourly average η_Q in a dust storm day

表 3 额济纳旗 2002 年 4 月 28 日 (沙尘暴日) PAR、Q 及 η_Q 的小时累计值Tab. 3 The hourly cumulative values of PAR, Q and η_Q on April 28 of 2002 (dust storm day)

	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
PAR/MJ·m ⁻²	0.22	0.15	0.32	0.53	0.48	0.42	0.43	0.51	0.40	0.34	0.20	0.09
Q/MJ·m ⁻²	0.31	0.19	0.43	0.81	0.79	0.73	0.82	0.98	0.75	0.75	0.47	0.21
?Q/%	71.8	81.6	75.1	66.1	60.2	56.7	52.0	51.8	53.0	44.7	44.0	44.6

暴天气下大气沙尘含量较高, 虽然沙尘在 0.3~0.7 μm 光谱范围内吸收很强, 但是在 0.7~2.0 μm (或 4.0 μm) 的粗光谱范围内沙尘的吸收更加强烈, 因此也会造成 η_Q 的偏大。③ 沙尘暴天气下, 由于冷空气作用, 大气水汽凝结, 湿度增大, 也可能造成 η_Q 变大。综上所述, 沙尘暴天气下的 η_Q 比晴天日下的要明显偏大。

沙尘暴日 7:00~11:00 期间 η_Q 的值均大于 60.0% (表 3)。McCree^[27]曾报告在布满浓云的阴天里, 瞬间 η_Q 会高达 58.0%~59.0%, 对比发现, 在沙尘暴天气下, 大气中的大量沙尘及水汽等因素对 η_Q 的影响可能会远大于浓云的影响。

2.3 空气温度

2.3.1 气温的月变化 绿洲与林地外的气温差异显示 (表 4)。胡杨林、柽柳林在 6~9 月份主要生长季里 2m 高度处的气温均低于林地外, 胡杨林平均比林外低约 1.62 $^{\circ}\text{C}$, 柽柳林平均比林外低 0.83 $^{\circ}\text{C}$ 。胡杨林在夏季林冠枝叶茂盛, 阻挡太阳辐射的能力比柽柳林强, 所以在 6~9 月各月均低于柽柳林, 而在 5 月乔木树种胡杨进入枝叶速生期, 对风的阻挡作用强, 而灌木树种柽柳枝叶开始萌发, 并且在 2m 高度处对风的阻挡很小。因此, 胡杨林内气温则高于柽柳林。10 月份, 气温降低幅度较大, 林外由于没有植被阻挡和植物本身吸收热量而降温更低, 其温度低于胡杨和柽柳林地。从总体来看, 生长季节绿洲气温均低于林外, 表明森林具有降低温度、缩小温差的显著作用。胡杨林地气温低于柽柳林地说明森林的这种作用与森林覆盖率、地面状况以及树种有很大的关系, 森林覆盖率越高森林降温作用越明显。

2.3.2 气温的垂直变化 生长季节, 绿洲林冠层顶气温高于绿洲内部, 一般由上至下逐渐变化 (图 3)。胡杨林上下温差变化在 0.97~5.74 $^{\circ}\text{C}$, 柽柳林上下温差变化在 0.61~3.49 $^{\circ}\text{C}$, 胡杨林差异最大值出现在 8 月, 柽柳林在 10 月。就各月气温垂直变化而言, 5 月份胡杨林和柽柳林差异最大, 胡杨林气温由地表向 2m 处迅速增加, 2m 向 4m 迅速递减; 柽柳林则相反, 气温由地表向 1m 处迅速递减, 1~2m 处增加, 2m 以上

表 4 额济纳旗胡杨和柽柳林地气温的月变化 ($^{\circ}\text{C}$)
Tab. 4 Monthly variations of the air temperature in *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* forests

林分	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
胡杨林地	24.06	25.36	27.31	25.34	15.12	10.15	21.22
柽柳林地	22.17	25.86	28.32	25.62	16.48	12.67	21.85
林地外	20.30	26.50	28.90	27.30	16.90	8.90	21.47

气温 Air temperature

图 3 额济纳旗胡杨 (a) 和柽柳 (b) 林地气温的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of the air temperature in *Populus euphratica* (a) and *Tamarix ramosissima* (b) forests

基本没有变化。林地气温的垂直分布：①绿洲林冠层顶气温高于绿洲内部，一般由上至下逐渐递减。②不论胡杨还是柽柳林地，气温垂直变化都具有地表到1m高度处气温变化幅度最大，2m以上变化幅度小的特点。③在极端干燥的天气情况下，气温的垂直变化很小。

2.4 大气相对湿度

2.4.1 空气湿度的月变化 表5表明：①林地（胡杨林和柽柳林）平均大气相对湿度均高于林地外。胡杨林生长季比林地外高8.5%，柽柳林平均比林地外高4.2%，且各月相对湿度均高于林地外。由于林冠的遮盖作用使林地保持了较高的湿度，但在5~6月相差较小；胡杨林比林地外高4.9%~6.3%，柽柳林比林地外仅高4%~4.7%；在9~10月相差较大，胡杨林比林地外高9.3%~16%，林内外湿度变化趋势相同，湿度最高值均出现在8~10月，林地湿度变幅小于林地外，说明在极端干旱区林分在维持植物生命最低需水方面起了独特作用。②不同林地类型对空气相对湿度的影响不同。胡杨属于阔叶乔木林，林冠的遮蔽作用较针叶灌木林柽柳强。因此，胡杨林地空气相对湿度各月值高于柽柳林地，平均湿度比柽柳地高4.33%。

2.4.2 空气湿度的垂直分布 图4表明：①绿洲林冠层顶空气相对湿度均低于林内。②胡杨林空气相对湿度变化幅度大于柽柳林，胡杨变化幅度为25.8%~58.6%，柽柳林变化幅度为24.5%~38.7%；③胡杨林内空气相对湿度以5月、10月变化最大，而且规律不太明显，这与阔叶林树种有关。④柽柳林在1m高度处各月的变化很小，可以发现在2m处的相对湿度均大于4m处，原因是这个高度正是灌木的冠层分布的高度。

2.5 土壤温度

从绿洲土壤温度的月变化可以看出（表6），柽柳林地月平均土壤温度高于胡杨林地，这与植被的覆盖度关系极为密切。胡杨林在5~9月林冠枝叶茂盛，阻挡太阳辐射的能力比柽柳林强，所以在5~9月各月均低于柽柳林，10月，胡杨落叶对太阳辐射的遮蔽能力减弱，表现为其平均土壤温度高于柽柳林地。

从不同林地类型土壤温度的垂直分布来看（图5），20~40cm处的地温变化微小；而且表现出胡杨林又低于柽柳林。胡杨地土壤温度垂直变化表现为5~8月变化不明显，但9~10月变化大，主要变化层为0~10cm土层温度的剧变，10~40cm土层5~8月呈递减趋势，9~10月递增，这

表5 额济纳旗胡杨林、柽柳林和林地外空气相对湿度的月平均变化（%）

Tab. 5 Monthly variations of the relative humidity in *Populus euphratica* forest, *Tamarix ramosissima* forest and outside forest (%)

林分	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
胡杨林	27.50	30.50	39.40	34.90	48.60	44.10	37.48
柽柳林	25.25	30.34	34.30	34.25	36.41	38.32	33.15
林地外	21.20	25.60	31.50	34.10	32.50	34.80	29.00

相对湿度 Relative humidity (%)

图4 额济纳旗胡杨（a）和柽柳（b）林地湿度的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of the relative air humidity in *Populus euphratica* (a) and *Tamarix ramosissima* (b) forests

表6 额济纳旗胡杨和柽柳林地土壤温度的月变化（%）

Tab. 6 Monthly variations of the soil temperature in *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* forests (%)

林分	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
胡杨林	15.67	20.29	22.17	19.07	16.43	15.58	18.20
柽柳林	17.60	21.95	22.67	22.70	17.74	13.90	19.43

土壤温度 Soil temperature (°C)

图 5 额济纳旗胡杨 (a) 和柽柳 (b) 林地土壤温度的垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of the soil temperature

in *Populus euphratica* (a) and *Tamarix ramosissima* (b) forests

风速 Wind speed (m/s)

图 6 额济纳旗胡杨 (a) 和柽柳 (b) 林地风速的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of the wind speed in *Populus euphratica* (a) and *Tamarix ramosissima* (b) forests

与胡杨生长状况紧密相关, 9~10月, 胡杨开始落叶, 对太阳辐射的遮蔽作用减弱的原因。柽柳地土壤温度垂直变化表现各月变化趋势一致。可见胡杨林在炎热的夏季, 可显著降低地表及地下0~20cm土层的温度, 缓冲地表及地下0~20cm土层温度的剧变, 有利于土壤微生物的活动, 并能降低土壤表层水分蒸发, 增加降水的有效性, 而柽柳林并不能很好地降低0~20cm土层的温度。

2.6 风速的变化

风力的变化表现在林冠对风速的阻挡, 使的近地层风速显著降低。5~10月, 胡杨林地平均风速为0.33 m/s, 比林外的3.03 m/s, 降低了2.7 m/s; 柽柳林5~10月平均风速为0.72 m/s, 比林外降低了2.31 m/s(图6)。胡杨林比柽柳林对风度的阻挡作用更强。从各月来看, 林外风速>柽柳林>胡杨林。可见, 在极端干旱区林分对风速的阻挡作用是相当明显的(表7)。

胡杨和柽柳林地风速垂直变化的共同特点是随高度的增加风速越大(图4)。胡杨林1m、2m、3m、4m、6m处的平均风速分别为0.23 m/s、0.24 m/s、0.25 m/s、0.40 m/s、0.55 m/s。柽柳林1m、2m、3m、4m、6m处的平均风速分别为0.24 m/s、0.45 m/s、0.72 m/s、0.91 m/s、1.28 m/s。但胡杨林风速随高度变化的幅度小, 柽柳林风速随高度的变化幅度比较大。胡杨林1~3m风速基本没有变化, 而柽柳林风速从1m到6m不断增大。

2.7 不同植物对比

对南亚热带季风湿润气候区的季风常绿阔叶林和中温带亚干旱区水源涵养林与极端干旱气候区荒漠河岸林作初步比较(表8)证明: 在极端干旱区荒漠河岸林对小气候作用相当明显, 可明显地改变太阳辐射、降低大气、地表和地下温度、降低风速、提高土

表 7 额济纳旗胡杨和柽柳林地风速的月变化 (m/s)

Tab. 7 Monthly variations of the wind speed in *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* forests (m/s)

林分	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
胡杨林	0.35	0.35	0.29	0.41	0.25	0.29	0.33
柽柳林	0.83	0.75	0.84	0.69	0.76	0.45	0.72
林地外	2.90	3.50	3.00	3.20	2.60	3.00	3.03

表 8 不同林分小气候特征比较

Tab. 8 The comparison of microclimate in different forests

比较项目	亚热带季风常绿阔叶林		中温带亚干旱水源涵养林			中温带极端干旱荒漠河岸林		
研究地点	广东省		内蒙古			内蒙古(额济纳旗)		
经纬度	23°10'N, 112°34'E		5861.52			40°20'~42°30'N, 99°30'~102°00'E		
总辐射 (MJ·m ⁻²)	3488.8~4792.31		6510~6720					
气温 (°C)	季风林	林地外	白桦林	油松林	林地外	胡杨林	柽柳林	林地外
湿度 (%)	19.9	21.5	14.28	14.87	15.52	7.8	8.5	21.47
土温 (°C)	87	78	68	65	61	37.5	33.2	29
0 cm	19.6	24.7	13.19	13.79	19.91	19.97	20.66	30.12
5 cm	19.8	24.8	10.81	12.66	18.89	20.34	18.26	29.21
10 cm	19.7	24.2	10.88	12.63	18.45	18.61	16.60	27.99
15 cm	20.1	24.1	10.90	12.38	18.55	17.94	16.39	24.00
20 cm	20.0	24.2	10.78	12.21	18.33	16.80	15.24	20.03
风速 (m/s)			0.25	0.16	1.17	0.33	0.72	3.03

壤及大气湿度等，比其他林更有意义的生态作用。

荒漠河岸林冠层顶部的太阳总辐射量月平均只有裸地表面的 50%，季风常绿阔叶林冠层顶部的太阳总辐射量年平均为裸地表面的 72.8%，荒漠河岸林在捕获太阳辐射能方面更有效果。同样胡杨林的降温作用强于季风林、白桦林和油松林(表 8)。

由于林冠层阻挡了林内外空气的交流，林内水分自成小循环，保持高湿环境。极端干旱区胡杨和柽柳林内大气相对湿度较低，但与林外相比平均湿度分别比对照高 8.5% 和 4.2%，季风林地高于林外 9%，中温带亚干旱区水源涵养林白桦林、油松林分别高于对照地 7% 和 4%。体现了极端干旱环境条件下的荒漠河岸林更具有保湿作用。

与林外地相比，季风林林内比林外的土壤温度降低了 4~5 °C，水源涵养林降低了 6~8 °C，荒漠河岸林降低了 7~10 °C。荒漠河岸林显著降低地表及地下 0~20 cm 土层的温度，缓冲土温的剧变，有利于土壤微生物的活动，并能降低土壤表层水分蒸发，增加降水的有效性。

白桦林平均风速比林外降低了 0.92 m/s；油松林降低了 1.01 m/s；胡杨林降低了 2.7 m/s；柽柳林降低了 2.31 m/s。可见，在极端干旱区荒漠河岸林对风速的阻挡作用是相当明显的。

3 结论

(1) 绿洲内太阳总辐射、气温低于林地外，大气相对湿度、风速高于林地外。绿洲群落改变太阳辐射，调节近地层及地表、地下温度，缩小温差，以及降低风速，提高土壤及大气湿度，减少风力侵蚀等重要生态作用。故而能很好的保护着当地的水土资源，改善着环境，维护生态平衡。

(2) 胡杨和柽柳两种群落的小气候差异为：在生长季节，太阳总辐射量胡杨林地低于柽柳林地；夏季净辐射胡杨林地高于柽柳林地，秋季反之。胡杨林地气温低于柽柳林地，胡杨林气温由地表向林冠层递减，柽柳林则递增。空气相对湿度胡杨林地各月值高于柽柳林地，平均湿度比柽柳地高 4.3%，胡杨林地空气相对湿度变化幅度大于柽柳林地。土壤温度月平均值胡杨林地低于柽柳林地，由地表向地下递减的趋势。胡杨林比柽柳林对风沙的阻挡作用强，胡杨和柽柳林地风速垂直变化随高度的增加而增大，但胡杨林风速随高度变化的幅度小，柽柳林风速随高度的变化幅度比较大。

(3) 该绿洲在沙尘暴天气下，PAR 的日总量明显小于典型晴天日和阴天日值，沙尘暴对 PAR 的削弱作用远大于云和水汽的作用；沙尘暴日，PAR 和 Q 的变化趋势基本一致，

有一定的线性相关关系, 但比晴天日和阴天日相关关系差。在沙尘暴天气下 η_Q 总体非常大, 且变化不稳定。

(4) 荒漠河岸林内太阳辐射减弱, 温度降低, 湿度增加, 风速减小, 这些功能在深居内陆、降水稀少、蒸发强烈、风大沙多的极端干旱区能很好地保护水土资源, 改善生态环境, 维护生态平衡, 保障绿洲农牧业生产, 为当地人民提供更好的生产生活条件等作用, 具有较高的生态、经济和社会效益。目前急需解决的问题是恢复和保护胡杨、柽柳等荒漠河岸林植被的生境, 采用人工复壮更新及繁育技术, 扩大其面积, 增强其生长势, 增加多样性, 使系统内部的种群和群落结构得到优化, 更好地实现系统的整体功能, 充分发挥荒漠河岸林生态系统在干旱区环境保护中的作用, 维护人类赖以生存的环境。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Yiping, Liu Yuhong, Ma Youxin et al. A preliminary study on microclimate in the process of the different growth phases of tropical forest. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26(1): 83-87. [张一平, 刘玉洪, 马友鑫等. 热带森林不同生长时期的小气候特征. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2002, 26(1): 83-87.]
- [2] Yan Junhua, Zhou Guoyi, Wei Qin. Environment of microclimate of monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2000, 18(5): 397-404. [闫俊华, 周国逸, 韦琴. 鼎湖山季风常绿阔叶林小气候特征分析. 武汉植物学研究, 2000, 18(5): 397-404.]
- [3] Bai Yuying. Observation on small climate in forest for conserving water in Daqingshan Mt. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1999, 21(3): 23-28. [白育英. 大青山水源涵养林小气候观测研究. 内蒙古林学院学报 (自然科学版), 1999, 21(3): 23-28.]
- [4] Federer C A. Spatial variation of net radiation, albedo and surface temperature of forests. *J. Appl. Meteorol.*, 1968, 7: 789-795.
- [5] Garrett H E. Spatial and temporal variation in carbon dioxide in an oak-hickory forest ravine. *For. Sci.*, 1978, 24(2): 180-190.
- [6] Wang Zhengfei, Zhu Tingyao, Zhu Jinwei. *Meteorology of Forest*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1985. [王正非, 朱廷曜, 朱劲伟. 森林气象学. 北京: 中国林业出版社, 1985.]
- [7] Richard L. *Forest Microclimatology*. Translated by Yao Qirun. Beijing: China Meteorological Press, 1986. [Richard L. 森林小气候 姚启润译. 北京: 气象出版社, 1986.]
- [8] Kimmins J P. *Forest Ecology*. Translated by Wen Jianping. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992 [Kimmins J P. 森林生态学. 文剑平译. 北京: 中国林业出版社, 1992.]
- [9] Hirose T et al. Canopy structure and photon flux partitioning among species in a herbaceous plant community. *Ecol.*, 1995, 76(2): 466-474.
- [10] Tan Shaoman, Huang Jinlong. A preliminary study on microclimate in mixed forest of *Eucalyptus torelliana*. *Acta Ecologica Sinica*, 1985, 5(3): 241-248. [谭绍满, 黄金龙. 托里桉混交林小气候特点初探. 生态学报, 1985, 5(3): 241-248.]
- [11] Sun Xuefeng, Chen Lingzhi. A preliminary study on the environment of radiation energy of deciduous broad-leaved forest in the warm temperate zone. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 278-286. [孙雪峰, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林辐射能量环境初步研究. 生态学报, 1995, 15(3): 278-286.]
- [12] Chang Jie, Pan Xiaodong, Ge Ying et al. Features of the micro-climate in the evergreen broad-leaved forest dominated by *Quercus glauca*. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 68-75. [常杰, 潘晓东, 葛滢等. 青冈常绿阔叶林内的小气候特征. 生态学报, 1999, 19(1): 68-75.]
- [13] Zhang Yunlin, Qin Boqiang. The basic characteristic and climatological calculation of the photosynthetically available radiation in Taihu region. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2002, 23(1): 118-123. [张运林, 秦伯强. 太湖地区光合有效辐射(PAR)的基本特征及其气候学计算. 太阳能学报, 2002, 23(1): 118-123.]
- [14] Britton C M, Dodd J D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Agricultural Meteorology*, 1976, (17): 1-7.
- [15] Sivakumar M V K, Virmani S M. Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1984, (31): 131-141.
- [16] Sinclair T R, Lemon E R. Penetration of photosynthetically active radiation in corn canopies. *Agronomy Journal*, 1974, (66): 201-205.
- [17] Sinclair T R, Knoerr K R. Distribution of photosynthetically active radiation in the canopy of a loblolly pine plantation,

- 1982, (19): 183-191.
- [18] Alados I, Olmo F J et al. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, (102): 39-50.
- [19] Yann Nouvellon, Agnes Begue et al. PAR extinction in shortgrass ecosystems: effects of clumping sky conditions and soil albedo, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, (105): 21-41.
- [20] Xianzhou Zhang, Yiguang Zhang et al. Measuring and modeling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April- October. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, (102): 207-212.
- [21] Fu Xiaofeng. A study on the oasis coordinating development of economy and environment in arid land. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(2): 197-200. [傅小锋. 干旱区绿洲发展与环境协调研究. *中国沙漠*, 2000, 20(2): 197-200.]
- [22] Chen Hesheng, Kang Yuehu, Feng Jinzhao. Preliminary study on the plant growth and water balance in Shapotou area, Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 1991, 11(2): 1-10. [陈荷生, 康跃虎, 冯今朝. 腾格里沙漠沙坡头地区植物生长与水分平衡的初步研究. *中国沙漠*, 1991, 11(2): 1-10.]
- [23] Feng Jinzhao, Huang Zichen, Zhang Chenglie. Advance in quantitative research of environmental plant physiology. *Journal of Desert Research*, 1997, 17(1): 89-94. [冯今朝, 黄子琛, 张承烈. 环境植物生理学定量研究的若干进展. *中国沙漠*, 1997, 17(1): 89-94.]
- [24] Zhang Guosheng. Research progress on trees and shrub drought-resistance and woodland water activity in arid and semi-arid region. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(4): 363-368. [张国盛. 干旱、半干旱地区乔灌木树种耐盐性及林地水分动态研究进展. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 363-368.]
- [25] Zhang Li, Dong Zengchuan, Huang Xiaoling. Modeling on relation between major plants growth and groundwater depth in arid area. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1): 110-113. [张丽, 董增川, 黄晓玲. 干旱典型植物生长与地下水位关系的模型研究. *中国沙漠*, 2004, 24(1): 110-113.]
- [26] Ji Guoliang, Ma Xiaoyan, Zou Jiling. Characteristics of the photosynthetically active radiation over Zhangye region. *Plateau Meteorology*, 1993, 12(2): 141-146. [季国良, 马晓燕, 邹基玲. 张掖地区的光合有效辐射特征. *高原气象*, 1993, 12(2): 141-146.]
- [27] McCree K J. A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorol.*, 1966, (3): 353-366.

Microclimatic Characteristics of the Heihe Oasis in the Hyperarid Zone

FENG Qi, SI Jianhua, ZHANG Yanwu, YAO Jiming, LIU Wei, SU Yonghong
(*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The microclimate of a desert oasis in the hyperarid zone of China was monitored using micrometeorological methods and compared with those of areas adjacent to forested land. Differences in ground-level photosynthetically active radiation (PAR) on clear, cloudy and dust storm days and their subtending causes are analysed and discussed. Desert oases serve the ecological functions of altering solar radiation, adjusting near-ground and land surface temperatures, reducing soil temperature differences, lowering wind velocity, and increasing soil and atmospheric humidity. The total solar radiation in the interior of the oasis was roughly half of that outside a forest canopy. During the growing season, air temperatures in *Populus euphratica* Oliv. (poplar) and *Tamarix ramosissima* Ledeb. (tamarisk) forests were 1.62 °C and 0.83 °C lower, respectively, than those in the areas around the forests. Furthermore, the taller the forest cover, the greater the temperature drops; air temperatures in the upper storey were greater than those in the lower storey, i.e., air temperature rose with increasing height. Over the growing season, the relative humidities of the air in the poplar and tamarisk forests were 8.5% and 4.2% higher, respectively, than those in areas around the forests. Mean wind velocity in poplar-forested lands was 0.33 m s^{-1} , 2.31 m s^{-1} lower than that in the surrounding area. During dust storm days the PAR was significantly lower than on cloudy or clear days, when it was high and varied in an irregular manner.

Key words: hyperarid zone; oasis; photosynthetically active radiation (PAR); microclimate; lower Heihe River; Inner Mongolia