

# 黑河地区绿洲生态条件下麦田生物气象若干特征

郑海雷<sup>1</sup>, 赵松岭<sup>2</sup>, 王介民<sup>3</sup>, 黄子琛<sup>4</sup>, 米谷俊颜<sup>5</sup>, 大龙英治<sup>6</sup>

(1. 厦门大学生物系, 厦门, 361005; 2. 兰州大学干旱农业生态国家重点实验室, 兰州, 730000; 3. 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000; 4. 中国科学院兰州沙漠研究所, 兰州 730000; 5. 日本冈山大学资源生物科学研究所, 仓敷, 710; 6. 日本冈山大学文理学院, 冈山, 700)

**摘要:** 观测分析了 HEIFE 地区绿洲中麦田的一些微气候特征, 结果表明 SPAC 中水势随高度呈显著梯度分布, 在土壤-植物以及植物-大气界面, 水势值存在两个大的跳跃; 水势廓线存在明显的日变化; SPAC 各部分水势变化的起伏顺序是大气 > 植物 > 土壤, 说明水势变化受植物水分代谢进程直至气象因子的强烈影响和控制。冠层上方近地面风温湿的时空剖面显示出白天与夜晚相比, 大气混合得较好; 日出前则大气较为稳定; 在典型晴天条件下, 麦田上方的大气存在内边界。其结构受来自沙漠干热风的影响和控制。冠层内部也存在着温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度、PAR、蒸腾作用、光合作用、气孔导度和叶温的垂直梯度, 其廓线的日变化主要受太阳辐射的强烈控制, 同时也受冠层内部不同层面叶片水分代谢强弱以及土壤状况的影响, 其温湿廓线表现出与冠层上方不同的变化模式。

**关键词:** 河西走廊; 绿洲生态系统; 春小麦; SPAC; 冠层; 生物气象学; 垂直剖面

## Some biometeorological features of wheat field in the ecological conditions of oasis at the Heihe Region

ZHENG Hai-Lei<sup>1</sup>, ZHAO Song-Ling<sup>2</sup>, WANG Jie-Min<sup>3</sup>, HUANG Zi-Chen<sup>4</sup>, MAITANI Toshihiko<sup>5</sup>, OHTAKI Eiji<sup>6</sup>, (1. Department of Biology, Xiamen University, Xiamen 361005 China; 2. National Key Laboratory of Arid Agroecology, Lanzhou University, Lanzhou 73000 China; 3. Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000 China; 5. Research Institute for Bioresources, Okayama University, Kurashiki, Japan, 710; 6. College of Liberal Arts and Sciences, Okayama University, Okayama, Japan, 700)

**Abstract:** We observed and analysed some characteristics of biometeorology over and within canopy in spring wheat field in the ecological conditions of oasis during HEIFE program. Water potential in SPAC appeared a well vertical profile and the profile showed an obvious diurnal variation. There were water potential jumps in the SPAC junction boundaries. Sequence of variation intensity for water potential in each part of the SPAC was atmosphere, plant and soil. It is shown that the water potential was influenced and controlled strongly by the process of plant water metabolism and up to meteorological factors. Atmosphere mixed well in day time in comparison with night time in near surface over the wheat field from the time-space section of wind speed, ambient temperature and relative humidity. The structure of atmosphere was stable before sun raising. It revealed that the atmospheric features over wheat canopy in oasis were affected and controlled by hot and dry air from desert or Gobi. There were also ambient temperature, relative humidity vertical profiles within canopy as well as CO<sub>2</sub> concentration, PAR, leaf transpiration, photosynthesis, stomatal conductance and leaf surface temperature. The diurnal varia

基金项目: 中国科学院、国家自然科学基金(No. 9487004)和日本文部省(No. 02041043)联合资助项目

感谢 HEIFE 项目中 BOP 期间的所有观测人员

收稿日期: 1999-10-15

作者简介: 郑海雷(1966~), 副教授

tions of profiles were driven mainly by the solar radiation, and in the same time, also were affected by the intensity of leaf water metabolism in different height leaf layer within canopy and soil status. The vertical profiles of ambient temperature and relative humidity within canopy appeared a quite different variation pattern in comparison with over canopy.

**Key words:** Hexi Corridor; oasis ecosystem; spring wheat; SPAC; canopy; biometeorology; vertical profile  
文章编号: 1000-0933(2000)03-0357-06 中图分类号: S181 文献标识码: A

生物气象是指某一特定生态条件下产生的表征该条件下特定环境状况的各生态因子的总和, 是生物群落和环境间相互作用的结果, 在一定程度上能反映出生物和环境间作用的物理过程和生物学机理, 对它的研究是陆地-大气间相互作用过程研究的重要组成部分, 也是国际地圈生物圈计划(IGBP)中水循环的生物学过程研究(BAHC)的主要内容<sup>[1]</sup>。

“黑河地区地气相互作用的观测试验(HEIFE)”是继国际上 HAPEX 和 FIFE<sup>[2]</sup>之后的一次大规模陆地生态系统和地区相互作用的野外观测试验, 是 IGBP 的核心计划 BAHC 的一项重要实施项目之一<sup>[3]</sup>, 其主要内容就是研究不同下垫面生态条件下的能量和物质平衡。

黑河是流经河西走廊的一条主要河流, 为在河西地区大面积沙漠和戈壁间分布的许多绿洲提供了丰富的水源。麦田是这一地区各绿洲内农田的主要利用形式, 因此研究这一地区麦田微气候特征不仅为陆面过程的参数化提供依据, 而且也在农业生产上具有一定的参考价值。为此作者观测了黑河地区张掖绿洲麦田的微气候特征, 其内容是 HEIFE 项目中生物气象观测(BOP)计划的中心内容。

## 1 自然概况与研究方法

### 1.1 自然概况

实验观测场位于河西走廊中部甘肃省农业科学院张掖实验农场(38°50'N, 100°22'E, 1565 m MSL), 南北宽 55 m, 东西长 110 m, 与观测场相邻的是大片的麦田。其位置在张掖市西南部 9km 处, 距离最近的沙漠约只有不到 30km。是 HEIFE 计划的中心观测站。HEIFE 试验区的总体概况参见文献[4]。该地区的气候类型属典型的温带干旱区。年降水量约 100 mm, 约 60% 的降水集中在 7 月份到 9 月份, 只有 3% 集中在冬季, 降水强度很弱。年潜在蒸发量超过 2000 mm, 约为年雨量的 20 余倍, 年平均气温为 7.6℃; 最高达 39.1℃; 最低为 -27.3℃, 无霜期 168 d。在春季多有大风和沙尘暴活动。

### 1.2 实验材料

供试作物为春小麦 W11(*Triticum aestivum* L. cv. 'W11')。于 3 月底播种, 7 月 22 日收割。播种密度为 54.5g/m<sup>2</sup>, 约合 817 万株/hm<sup>2</sup>。土壤为砂壤土, 播种前 0~20cm 土层的水分含量为 24%, 整个生育期间降雨和灌溉之和约为 350mm。播种时土壤养分状况为氮 98.45kg/hm<sup>2</sup>、磷 40.76kg/hm<sup>2</sup>。在整个生育期间小麦生长良好。

### 1.3 研究方法

土壤水势用负压计法<sup>[5]</sup>测定, 所用负压计为 SK-5608 型土壤水分张力计(Mikai 株式会社), 探头深度分别为 5、10、30 和 80 cm, 采样间隔为 20 min。叶片水势的测定用 Scholander 的压力室法<sup>[6]</sup>, 所用压力室为 ZLZ-4 型植物水分测定仪(兰州大学植物生理研究室)。测定间隔为 4 h, 测定时取 5 片叶子为样本, 取其均值。测定高度分别为 10、30、50 和 70 cm, 分别对应第 1、第 2、第 3 和第 4 层叶片(从下向上计)。大气水势按 Kramer<sup>[7]</sup>的定义根据在 1、2、4、8 和 20 m 处测得的湿度及温度计算得出。

麦田上方的风湿温时空剖面由 MILOS-200 型自动气象站(Vaisala, Finland)进行观测。自动气象站高 20m, 与本研究有关的探头有 6 层风速; 5 层温度和湿度探头, 在观测前各探头和整个系统都进行了全面校准。温度探头为 DTS12 型, 最大直径 15 mm, 分辨率 0.04℃; 湿度探头为 HMP30u 型, 测定范围 0%~100%, 分辨率 0.03%; 风速由 WAA15 型风速仪测定, 测定范围 0~75m/s, 精度 ±0.1m/s。各探头获得信号后将信息存入数据存储器。DTS12 型固态贮存介质 EPROM 上, 采样间隔为 1h, 整个系统由太阳能电池供电。

冠层内部的温湿度及 CO<sub>2</sub> 浓度用改进后的 LI-6000 型便携式光合系统(LI-COR Co, Lincoln, NE,

USA)测定。气样温度由线性热敏电阻测得,其分辨率为  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;湿度由 HUMICAP 薄膜型电容(Vaisala, Finland)测得; $\text{CO}_2$  浓度由 LI-6050 型红外分析仪测得。测定高度为 2、10、25、65 和  $100\text{ cm}$ ,其各高度的气样通过大气采样器送入 LI-6000 光合系统进行分析,为了减少样气的改变,气路以最短的方式联接(图 1)。

各层叶片的光合作用、蒸腾作用、气孔导度、叶温 and 光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR  $400\sim 700\text{ nm}$ )通过 LI-6000 型光合系统测定。叶温由 Chromel-constantan 热电偶测定,热电偶直径  $0.076\text{ mm}$ ,分辨率达  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;PAR 用安装在 LI-COR 系统上的 LI-190S-1 型光量子探头测定。与测定叶片水势类似,每一叶位取样 5 片,取平均值。

实验采用的时间均为  $105^{\circ}\text{E}$  的地方时。

## 2 结果讨论

### 2.1 麦田 SPAC 中水势的梯度分布

由于在 SPAC 中存在着在测定高度和水势值上的较大差异,因此将坐标取为对数坐标,这样能很好地反映土壤-植物部分水势的变化情况。图 2 给出了一典型晴天(1992 年 6 月 8 日)麦田 SPAC 水势廓线的日变化。可以看出土壤、植物、大气各部分的水势大小存在明显差异,以土壤水势最高;植物水势次之;大气水势最低。从测得的数据分析可知:土壤水势一般在  $-0.01\sim -0.1\text{ MPa}$  之间,植物水势一般在  $-0.5\sim -3\text{ MPa}$  之间,而大气水势则从负几十到负几百个 MPa 单位之间变动。水势值在土壤和植物之间及植物和大气之间存在着两个明显跳跃,即存在着数量级上的显著差异,这说明水分在 SPAC 中运动的势差是很大的,同时也反映了在这两个界面处存在着很大的影响水分传输的阻力,其中包括根系对水分的吸收阻力以及水分在通过气孔和叶片边界层时的阻力。从 SPAC 系统水势分布的垂直剖面看,水势分布的廓线存在着明显的日变化,虽然在土壤部分的水势在一日中的变化较小,但是在植物-大气部分,水势剖面的变化是显著的。在早晨  $6:00$  时,由于大气中湿度大;太阳辐射还很弱,叶片的蒸腾作用尚未显著开始,土壤、植物叶片和大气中的水分状况良好,因此这一时刻的水势廓线较为平直。随着太阳的升起,辐射的加强,小麦蒸腾作用明显升高( $10:00$  时,图 4(e)),使冠层和大气之间的湍流交换得到极大增加,大量水分随之散失,此时的水势陡度迅速加大,特别是在两个交界面处更是如此。但此时  $20\text{ m}$  高处的大气水势几乎和  $6:00$  的水势一样,说明此时该处的大气湿度变化不大。 $14:00$  时这种陡度进一步扩大,到了  $18:00$  时其陡度达一天中的最小。太阳落下后( $22:00$  时),蒸腾作用变弱以及大气中湿度的增大,SPAC 中水势的陡度迅速变弱,其廓线变得较为平缓,恢复速度比早上  $10:00$  时的陡度发生速度还要快速。从图中可以看出 SPAC 中各部分水势变化的起伏顺序是大气  $>$  植物  $>$  土壤,表明在 SPAC 系统中水势的变化首先受气象因子的强烈影响和控制,植物和土壤因子次之。

### 2.2 麦田上方风、温、湿时空剖面特征

图 3 给出了春小麦扬花期一晴朗天气下(6 月 13 日)冠层上方风温湿的时空剖面图。图中所示横坐标为一天中的时间,纵坐标为观测高度。风速大小虽然有很大的偶然性和易变性,但从图中可以看出(图 3(a)):近地表的风速在一天 24h 中都很弱,在作物冠层附近基本上整天只保持在  $0.4\text{ m/s}$  以下。日出前,由于湍流交换小,风速随高度分布的垂直梯度很弱,在  $20\text{ m}$  处风速也不超过  $0.8\text{ m/s}$ ,但自辐射增强以后(日出后),风速的垂直梯度迅速加大,从观测结果看风速的垂直分布随高度降低而呈指数减小。午后,风速的时空剖面趋向复杂化,在  $8\text{ m}$  高处出现一高风速区,其风速达  $3\text{ m/s}$ ,之后风速又减弱,到  $20\text{ m}$  高处,风速又增至  $4\text{ m/s}$ 。这种在中间出现的相对低风速区现象说明在冠层上方的低空和高空有两个不同的气团在相互作用。由于低层的相对湿度比高层的要大(图 3(c)),因此可以认为高空的气团是来自沙漠的干热气团(如在  $16:00$  时,万寿数据,温度为  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;风速高达约  $4\text{ m/s}$ ;湿度却只有约  $26\%$ ),而低空的气团是由于冠层与空气的湍流交换发展而成的湿热气团(如在  $16:00$  时, $2\text{ m}$  高度处,温度为  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;风速只有约  $1\text{ m/s}$ ;湿度

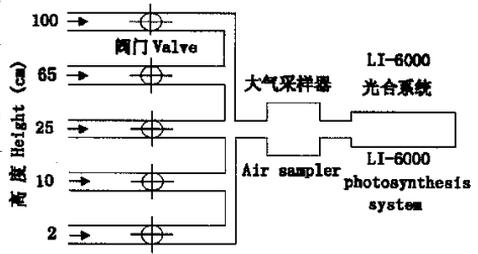


图 1 测定冠层内气温、湿度和  $\text{CO}_2$  浓度分布装置示意图

Fig. 1 Diagram of device for measurement of profiles of temperature, humidity and  $\text{CO}_2$  concentration within canopy

高达 44%)。表明在低层,湿度廓线受湿润下垫面即小麦冠层的控制,而在高层,湿度受干旱区大气结构的控制,即除了和春小麦冠层向大气输入大量水汽有关外,主要还和麦田上方大气的局地环流有关<sup>[8,9]</sup>。Businger 曾指出<sup>[10]</sup>,当有来自沙漠的干热空气吹向灌溉区域时,就会有内边界(Internal boundary)形成,同样的道理,当有来自灌溉区域的冷湿空气吹向沙漠时,也会有内边界形成。他认为造成这一现象的原因除了两种下垫面的粗糙度不同外,还和两地上方大气的稳定度不同有关。本文的观测结果也说明了午后在麦田上方也有内边界的形成,这也是绿洲生态条件下麦田微气候的重要特征。温度的时空剖面(图 3(b))显示在日出前的低空存在一低温中心,随着太阳辐射的加强,太阳辐射对地表的加温作用增强,使得温度随高度的变化微弱,温度梯度减小,在午后则在麦田上方又出现一个温度较高的热中心,在晚间,由于太阳直接辐射的消失和地表的冷却,大气处于逆温状态,使冠层上方低空在 24:00 时出现另一个低温中心。湿度在日出前在低层出现湿中心,到了午后,麦田上方又出现了一个干中心,到了晚间,近层大气较为稳定,抑制了水汽的湍流输送,使冠层近地表又形成了一个湿中心。

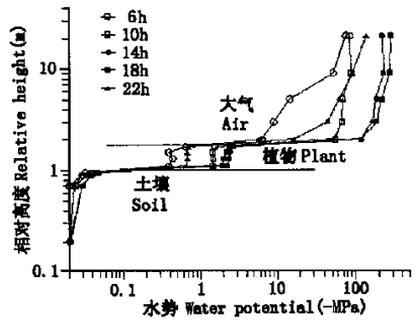


图 2 麦田 SPAC 中水势廓线日变化(1992 年 6 月 8 日)  
Fig. 2 Diurnal variation of water potential profile in the SPAC of wheat field (June 8, 1992)

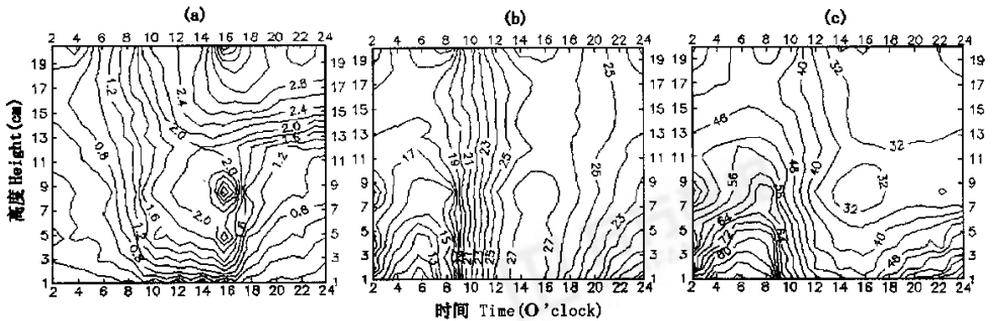


图 3 1992 年 6 月 13 日麦田上方风(a)、温(b)、湿(c)的时空剖面图

Fig. 3 Time-space cross section of wind speed(a), ambient temperature(b) and relative humidity(c) over wheat field on June 13, 1992

### 2.3 春小麦冠层内的微气候特征

由于冠层内部微气候发生的物理机制与冠层上方不同,因此,其变化的表现特征也有所不同(图 4)。在典型晴天且地表无风的天气条件下的观测结果表明冠层内部温度廓线(a)和冠层上方的廓线不同,在晚间,由于地表作为热源向大气散热,所以,近地表空气的温度高于远离地表的空气的温度,而在白天,由于太阳辐射对冠层的加温作用,使得温度在冠层内部的分布呈递减趋势。湿度的分布(b)则相反,在夜间由于蒸腾小,湿度随高度变化不大。在白天,由于冠层上部蒸腾的水分很快散失到大气中,而下部蒸腾的水汽还可在冠层中保持,因此冠层底部的湿度明显高于上部的湿度,傍晚这种梯度减弱。CO<sub>2</sub> 廓线(c)分布也呈现其特殊性。在 2:00、6:00 和 22:00,由于冠层的呼吸作用和土壤的呼吸作用使得地表的 CO<sub>2</sub> 浓度远高于冠层顶部的 CO<sub>2</sub> 浓度,在白天的 10:00、14:00 及 18:00 时,由于冠层进行光合作用,此时在冠层中上部 CO<sub>2</sub> 浓度的梯度为负,而在近地表,由于土壤仍然进行着呼吸作用及由于冠层下部叶片光环境差导致的弱光合作用使得冠层底部的 CO<sub>2</sub> 浓度仍然保持较高水平。另外在 60~70cm 处(穗所在高度)CO<sub>2</sub> 浓度突然

升高,这和穗所在的弱光合性能及强呼吸作用有关。光合有效辐射(d)则在白天呈典型的 Monsi 和 Seaki 形式分布<sup>[11]</sup>。在冠层内部除存在着温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度和 PAR 的廓线外,还存在着明显的蒸腾作用(e)、光合作用(f)、气孔导度(g)及叶温(h)在冠层内的垂直分布。在无辐射的 2:00、6:00 和 22:00 时,蒸腾作用的垂直差异很弱,而在有辐射的 10:00、14:00 和 18:00 时,其垂直差异显著,底层 10cm 的蒸腾只有约 10mgH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>·s,而在冠层顶部的 60cm 处却有 34~58mgH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>·s 的叶片蒸腾。光合作用也表现出类似的垂直分布特征。气孔导度的变化较为复杂,在 2:00 时各层气孔都几乎关闭,到凌晨 6:00 时,则气孔迅速张开,在垂直分布上则随高度降低呈急剧下降趋势,表明气孔的开闭对光照十分敏感。到 10:00 至 22:00,垂直差异大为缩小,但仍然表现出上部气孔导度大于下部气孔导度的分布特征。叶温的廓线亦表现出与蒸腾作用密切相关的特点,在白天由于太阳辐射的加温作用,冠层顶部的叶温高于低部的叶温。

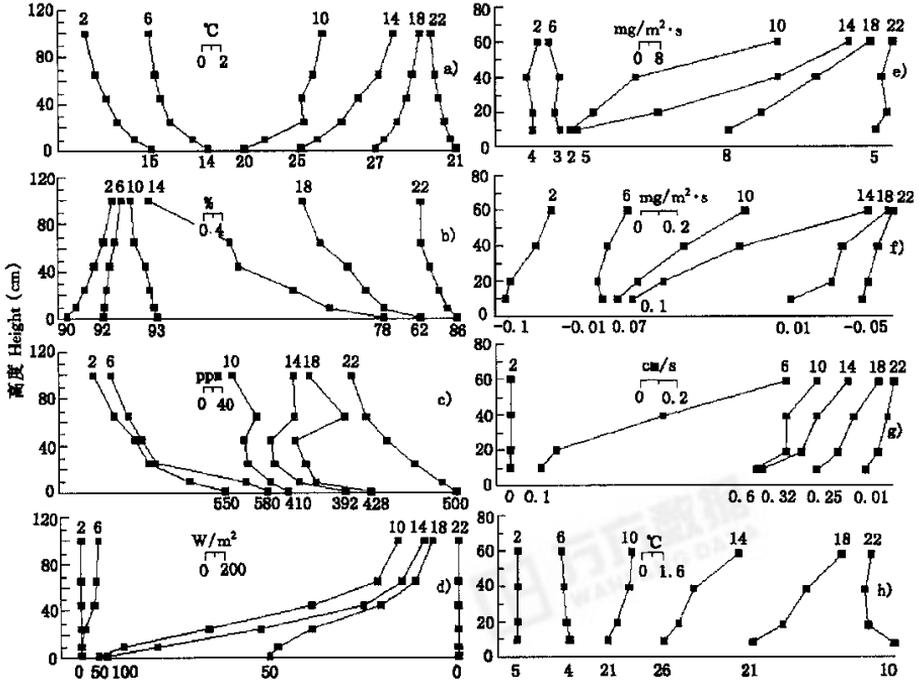


图 4 冠层内部气温(a)、相对湿度(b)、CO<sub>2</sub> 浓度(c)、PAR(d)、叶片蒸腾(e)、光合(f)、气孔导度(g)和叶温(h)垂直廓线日变化

Fig. 4 Diurnal variations of vertical profiles for ambient temperature (a), relative humidity (b), CO<sub>2</sub> concentration (c), PAR (d), leaf transpiration (e), photosynthesis (f), stomatal conductance (g) and leaf surface temperature (h) within spring wheat canopy

### 3 结论

3.1 在典型晴天条件下,SPAC 中水势随高度呈显著梯度分布,其中土壤水势最高、植物水势次之、大气水势最低;并且在土壤-植物以及植物-大气界面,水势值存在两个跳跃;水势廓线也存在明显的日变化;SPAC 各部分中水势变化的起伏顺序是大气>植物>土壤,说明 SPAC 的水势变化受气象因子的强烈影响和控制,植物和土壤因子次之。

3.2 在典型晴天条件下,冠层上方近地面风、温、湿的时空剖面显示,白天与夜晚相比,风速的垂直梯度较大,而温度和湿度垂直梯度较小,表明冠层上方大气混合得较好;日出前温湿的垂直梯度较大,表明此时冠层上方的大气较为稳定;在绿洲生态条件下,麦田上方的大气存在内边界,其结构受沙漠干热风的影响

和控制,表现出绿洲生态条件下特殊的麦田微气候特征。

3.3 在典型晴天且地表无风的条件下,冠层内部也存在温度、湿度、CO<sub>2</sub>浓度、PAR、蒸腾作用、光合作用、气孔导度和叶温的垂直梯度,其廓线的日变化不仅主要受太阳辐射的强烈控制,而且还受冠层内部不同层面叶片水分代谢强弱以及土壤状况的影响;温湿廓线表现出与冠层上方不同的变化模式。

### 参考文献

- [1] 林海,殷显曦.我国大气科学发展战略研究.地球科学进展,1992,7(4):39~46.
- [2] 高由禧.国家自然科学基金重大项目“HEIFE”专刊(1)前言.高原气象,1990,9(2):1~2.
- [3] 陈家宜.黑河地区地气相互作用观测试验研究.地球科学进展,1992,7(4):90~91.
- [4] Wang J M, Sahashi K and Mitsuta Y. Outline of HEIFE field observations. In: *Proceedings of International Symposium of HEIFE*. Mitsuta Y ed. Kyoto: Kyoto University. 1993, 22~29.
- [5] Richards S J. Soil suction with tensiometers. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*. Black AC ed. Madison: Americ. Soc. of Agron. 1965, 153~163.
- [6] Scholander P F, Hammel H T, Bradstreet E D, et al. Sap pressure in vascular plants; negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 1966, **148**: 339~346.
- [7] Kramer P J, Knippling E B and Miller L N. Terminology of cell-water relations. *Science*, 1966, **153**: 889~890.
- [8] 胡隐樵, 奇跃进, 杨选利. 河西戈壁(化音)小气候和热量平衡特征的初步分析. 高原气象, 1990, 9(2): 113~117.
- [9] 王介民, 刘晓虎, 祁永强. 应用涡旋相关法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究. 高原气象, 1990, 9(2): 120~129.
- [10] Businger J A. Some thought about the internal boundaries that form over irrigated areas in a desert environment. In: *Proceedings of International Symposium on HELEF*. Mitsuta Y ed. Kyoto: Kyoto University. 1993, 424~429.
- [11] Monsi M and Saeki T. Uber der lichifaktor in der planzengeseuschafthen und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 1953, **14**: 22~53.