

稻麦轮作农田区大气边界层高度的 日变化和季节特征

刘绕¹ 李煜斌² 高志球²

(1 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044)

摘要 利用 2015 年 7 月至 2016 年 5 月寿县稻麦轮作农田区观测站地基多通道微波辐射计观测的高时间分辨率温度廓线资料, 结合位温梯度法, 计算了该站点的大气边界层高度, 分析了边界层高度的日、月和季节演变规律。结果显示, 晴朗天气情况下, 边界层高度具备典型的日变化特征, 随着地面温度的升高边界层高度不断增大。其最大平均值通常出现在午后, 8 月平均高度最高, 超过 1520 m, 1 月最低, 只有 520 m。而且边界层高度具有季节变化趋势, 春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月至次年 2 月)平均高度分别为 436 m, 499 m, 377 m 和 322 m。将边界层高度结果与 FNL 和 ERA-Interim 数据进行对比, 发现在白天时间段(08:00—19:00)FNL 和 ERA-Interim 比观测平均值分别高 258 m, 346 m, 夜间时间段(19:00 至次日 08:00)比观测平均值分别低 144 m, 102 m。

关键词 大气边界层高度; 稻麦轮作农田; 微波辐射计; 日变化; 季节变化; FNL 分析资料; ERA-Interim 再分析资料

中图分类号: P404 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20160356 **文献标识码:** A

引言

大气边界层控制着地面与大气间动量、热量及水汽的交换, 对于天气、气候和污染物扩散有着重要影响^[1-2]。在大气数值模式中, 边界层高度作为大气边界层参数化模块和积云对流参数化模块的重要参数, 对天气、气候及污染状况的模拟有着显著影响^[3-4]。边界层高度在陆地下垫面总是表现出强烈的日变化特征^[1-2]。夜晚地面辐射冷却, 边界层高度较低, 而白天太阳加热产生对流, 边界层高度较高。边界层高度通常基于探空气球测得的温度、湿度和风速廓线计算得到, 而常规的无线电探空一般一天只有两次(世界时 00:00 和 12:00), 很难捕捉到完整的边界层高度的演变规律。近年来, 观测技术的发展给我们提供了获取边界层高度信息的更多手段, 如: 云高仪^[5], 激光雷达^[6-7], 风廓线雷达^[8-9], 声雷达^[10-11]和微波辐射计^[12-14]等。目前, 大多数的研究都集中于算法发展^[15]和交叉验证^[12, 16], 也有部分致力于边界层高度演变规律的系统观测研究^[4, 5, 17-18], 其中, Liu and Liang^[4]利用 1987—2008

年 14 个大型观测试验中获得的大量探空数据得到了不同地理位置和不同下垫面特征的边界层高度日变化特征, Zhang 等^[18]利用加密无线电探空数据得到了宜昌地区的边界层高度日变化特征。

我国东部有大范围的稻麦轮作农田, 其土壤含水量季节变化剧烈, 不同季节的大气边界层高度可能存在不同特征。而在农田下垫面, 尤其是我国主要农产区下垫面的大气边界层高度演变规律的观测研究较少, 这些区域上空边界层高度的日、月和季节特征也尚不明确。此外, 目前一些模式资料数据集(例如美国国家环境预报中心的 FNL 分析数据和欧洲气象中心的 ERA-Interim 再分析数据)已提供该区域上空的边界层高度数据, 然而由于该区域的边界层高度观测试验较少, 这些模式资料数据集的准确度尚不得而知^[19-21]。

微波辐射计能提供垂直高度 10 km, 时间分辨率为几分钟的温度与湿度的垂直廓线。前人研究^[12, 16, 22]发现基于微波辐射计的温度廓线可以较为准确地计算得到对流边界层高度值, 其平均误差小于 25 m, 并且时间分辨率可以达到 3 min, 所以, 微

波辐射计为精确认识稻麦轮作农田大气边界层高度演变状况和规律提供了有效手段。

安徽省寿县位于中国淮河流域中部,属亚热带北缘季风性湿润气候类型,平均海拔高度小于 50 m,是典型的稻麦轮作农田区。本研究将基于微波辐射计在该区域的观测,计算大气边界层高度并分析其演变规律。另外,本研究还将大气边界层高度的观测结果与模式分析数据进行对比,进一步认识现有分析数据中边界层高度数据的可靠性和准确性,为其他相关研究提供支撑。

1 数据和方法

本文数据来源于 2015 年 7 月至 2016 年 5 月期间寿县国家气候观测站(32.436°N,116.788°E)地基多通道微波辐射计观测的温度廓线。该微波辐射计是德国 RPG(Radiometer Physics GmbH)公司生产的 RPG-HATPRO 地基多通道微波辐射计^[23],它能够获得对流层 10 km 以下的温度廓线。数据观测精度高,时空覆盖率大,质量可靠:其 1000 m 以下温度测量误差小于等于 0.5 K,1000~2000 m 小于等于 0.8 K,2000 m 以上小于等于 1 K。500 m 以下观测数据的高度间隔小于等于 30 m,500~1000 m 小于等于 50 m,1000~2000 m 小于等于 100 m,2000 m 以上小于等于 400 m。观测期间由于设备故障和电力原因,各月数据样本天数不等,观测数据天数的逐月分布如表 1,其中 2016 年 3、4 月和 5 月获得的数据记录天数较少,分别为 9 天、9 天和 8 天,其余月份皆有 10 天以上。微波辐射计在

2016 年 5 月下旬遭遇鸟类严重损坏,后期无法继续观测。由于其观测频率平均为 3 min 一次,高度分辨率也不固定,为了计算大气边界层高度,读取每日观测资料中 2500 m 高度以下的的数据并换算成位温,最后将高度为 2500 m、时间为一天的位温资料二维线性插值得到垂直高度分辨率为 10 m,时间分辨率为 10 min 的位温资料。

另外,由于美国国家环境预报中心 FNL 分析数据以及欧洲气象中心 ERA-Interim 再分析数据^[24]已得到广泛应用,本文选取这两套数据中的边界层高度产品与实地观测进行比较,分析和探讨这两套数据中边界层高度产品的准确性。美国国家环境预报中心 FNL 分析数据是通过全球数据同化系统(GDAS)同化地面观测、无线电探空、气球、飞机、卫星观测资料等数据源得到,其数据产品每 6 h(世界时 0:00、06:00、12:00、18:00)发布一次,空间分辨率为 1°×1°。欧洲气象中心 ERA-Interim 再分析数据是基于多种资料的同化而获得,被同化的资料包括无线电探空和数值天气预报模型输出数据,其目的是为了优化数据的代表性并为一些没有观测资料的时间和区域提供大气数据产品,空间分辨率为 0.75°×0.75°,时间分辨率为 3 h(即世界时 03:00、06:00、09:00、12:00、15:00、18:00、21:00、24:00)。为了将 FNL 分析数据和 ERA-Interim 再分析数据与观测数据进行对比,我们将 FNL 或 ERA-Interim 网格数据中与观测站经纬度相邻 4 点的数据提取出来,使用面积权重插值法得出观测站经纬度处的大气边界层高度数据。

表 1 2015 年 7 月至 2016 年 5 月各月获得观测数据的天数

月份	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05
天数	29	19	30	14	22	23	10	20	9	9	8

对于垂直高度分辨率为 10 m,时间分辨率为 10 min 的 2500 m 高度的位温数据,计算边界层高度之前,首先将大气边界层的稳定状况分成 3 类^[15,25],即:不稳定层结,稳定层结和中性层结。依据文献[4],在陆地下垫面采用 200 m 和 40 m 之间的两层位温梯度进行分类如下:

$$\theta_{200} - \theta_{40} \begin{cases} < -\delta & \text{不稳定边界层(CBL)} \\ > +\delta & \text{稳定边界层(SBL)} \\ \text{其他} & \text{中性边界层(NBL)} \end{cases}$$

其中 θ 表示位温,单位(开尔文),下标表示垂直高度,40 m 的取值是为了去除下垫面不均匀的影响, δ 表示弱稳定层的位温增量,基于下垫面的特征实际应用中取小的正值,通过验证试验和误差分析,本文取值为 1.0 K。基于上述算法,本文计算过程中当 200 m 位温减去 40 m 位温小于-1.0 K 时为不稳定层结;当 200 m 位温减去 40 m 位温大于 1.0 K 时为稳定层结;当 200 m 位温减去 40 m 位温小于等于 1.0 K 且大于等于-1.0 K 时为中性层结。对

于每一时刻的位温廓线,当判定边界层的稳定状况时,计算该时刻的位温梯度,对于不稳定层结和中性层结,依据文献[4],大气边界层高度取为位温梯度第一次大于 $0.4\text{ K}\cdot\text{hm}^{-1}$ 的高度;对于稳定层结,由于位温廓线存在比较强的逆温,边界层高度取为逆温层顶的高度,依据 Dai 等^[26]的研究,这里取位温梯度第一次小于 $6.5\text{ K}\cdot\text{hm}^{-1}$ 时的高度。

2 结果和分析

2.1 大气边界层高度的典型日变化

晴朗的天气状况下,陆面大气边界层高度通常有显著的日变化,但是在阴天,其日变化特征不明显^[1-2,16]。图1(彩页)为寿县观测站一次典型晴天和一次典型阴天时大气边界层高度日变化图,图1a为2015年11月29日晴朗天气条件下位温廓线随时间的变化过程以及大气边界层高度的日变化特征。图中可以看出由于非均匀平流及较大湍涡的作用,除温度的日变化之外,温度的变化也呈现一定的高频波动特征,例如290 K位温高度在几十分钟内可以上升或下降数百米。本文主要讨论边界层高度的日变化,在这一天中从上午10:00到晚上20:00由于地面受到太阳辐射加热产生的空气对流使得大气处于不稳定状况,边界层高度由几十米上升到最高800 m,最大高度出现的时间在16:00,晚上21:00至第2天10:00之间,由于地面和下层空气的辐射冷却,空气处于稳定状态,边界层高度较低,高度小于100 m,早晨上升期为10:00,夜间转换期为20:00,ERA-Interim每日8次和FNL每日4次的高度也具有类似的日变化趋势,在边界层处于稳定条件下,高度与观测值较一致,不稳定条件下,两者都出现偏差,并且由于数据较少,边界层的早晚过渡时间不明显。图1b为2015年11月8日阴天状态下的位温和边界层高度的日变化特征,图中可以看出温度和边界层高度全天变化较小,高度全天处于500 m以下,FNL和ERA-Interim的资料也具有相似的结果。

2.2 大气边界层高度的月平均日变化

读取每日整点时刻(世界时00:00—23:00)前一次和后一次观测的温度廓线,线性插值得到每个整点时刻的温度廓线。换算成位温并计算出每天整点时刻的边界层高度,再对每个月进行月平均,得到月平均的边界层高度日变化。图2为大气边界层高

度月平均日变化的箱线图,包含25%、50%、75%高度值以及平均值。这里25%表示从该值至最低值包含总观测数量的25%,此外,50%与75%的含义按此规律类推。

由图2可见各月大气边界层高度都具有明显的日变化特征,日出后随着太阳辐射的增加,下层空气不稳定性增强产生对流,边界层高度增大,在午后时分高度上升到最大值,然后下垫面辐射减少造成空气对流减弱,边界层高度减小,日落后大气处于稳定层结状态,高度较小。各月边界层的最大上升高度存在差异,从2015年7月至2016年5月期间,边界层小时平均最大高度值从8月1520 m减小到1月520 m,5月又上升到674 m,这主要与一年中下垫面接收到的太阳辐射能量的变化有关。下面将具体介绍各月大气边界层高度日变化的演变规律。

图2a为7月边界层高度的日变化,图中7月日变化趋势比较明显,由于夏季太阳辐射强烈,地面接收的能量多,使得温度较高,边界层的最大高度超过1500 m,平均高度也接近1000 m(977 m),白天边界层高度波动变化比较剧烈,75%减去25%高度值变化为300~900 m大于夜间的200~300 m,早晨上升期为08:00(北京时间,下同),下午16:00平均高度值最大,977 m,夜间转换时间为21:00。

图2b 8月的日变化结果与7月相比,白天边界层高度上升幅度更大,最大高度超过2300 m,说明8月白天空气对流比较强烈,夜间平均高度均不超过300 m,50%的中间值变化从24:00至早上07:00之间均小于250 m,而7月份该时段均大于250 m,说明8月夜间边界层结构与7月相比较稳定。8月早晨上升期为08:00,午后15:00达到平均最大高度,为1520 m,夜间转换期为21:00。

图2c 9月边界层结构的日变化特征与图2a 7月的演变规律相一致,白天边界层高度具有较大的波动性,夜间时刻波动幅度较小。但是9月的高度振幅大于7月,其最大高度值超过1500 m,但平均值特征与7月相似,平均最大高度接近1000 m(977 m),都出现在16:00,说明9月与7月相比,既存在晴朗对流性天气,也包括稳定的天气状况,如9月19、20、21日为晴好的对流不稳定天气,5、17、29日为稳定性天气,早晨上升期为08:00,夜间转换期为21:00,平均最大高度值出现在16:00,为977 m。

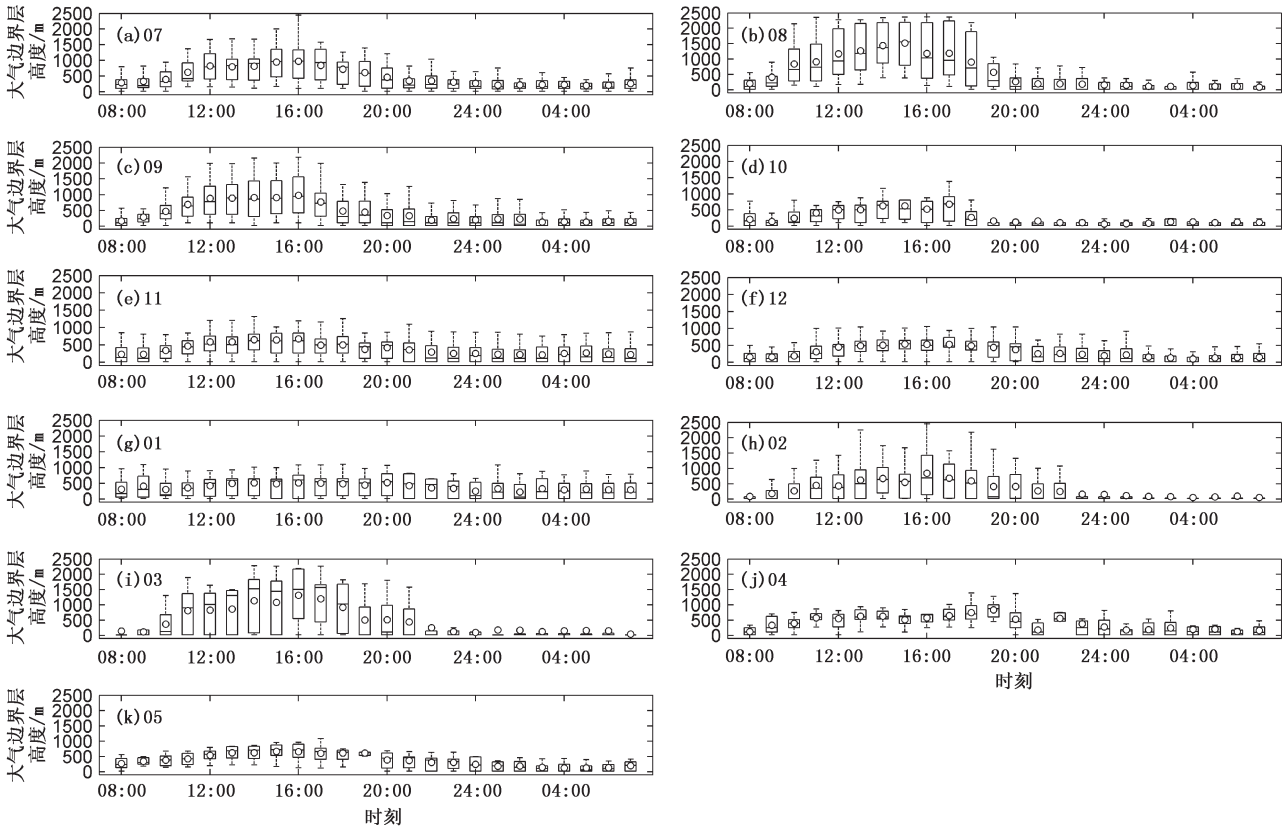


图 2 大气边界层高度月平均日变化的箱线图:(a) 7 月,(b) 8 月,(c) 9 月,(d) 10 月,(e) 11 月,(f) 12 月,(g) 1 月, (h) 2 月,(i) 3 月,(j) 4 月,(k) 5 月
(矩形盒中间横线表示中位数,矩形盒的上下边缘线分别表示 25%,75% 高度值,矩形盒上下两端的外延线包含所有的数据, 矩形盒中间的圆圈表示平均值)

图 2d 10 月的边界层高度日变化中,白天边界层高度上升,中间 50% 高度值变化较大,夜晚高度较低,50% 高度值变化较小,10 月平均最大值为 678 m(时间为 19:00)小于 7、8 月,说明 10 月整体天气状况较为稳定。早晨上升期为 09:00,夜间转换期为 19:00。图 2e 11 月全天边界层高度都存在波动变化,但是波动性较小,变化范围在 400 至 500 m,早晨上升期为 09:00,夜间转换期为 21:00,午后 16:00 达到平均最大高度值 676 m。

图 2f 12 月的日变化趋势与图 2e 11 月相似,边界层高度全天都具有波动性变化,但平均最大高度值为 535 m 小于 11 月的 676 m,50% 高度值变化在 200~400 m 之间也小于 11 月,最大高度值出现时间为 15:00,早晨上升期为 10:00,夜间转换期为 21:00。图 2g 1 月边界层高度同样具有全天波动变化,与 11、12 月相似,但是平均最大高度较小,只有 520 m(14:00),50% 高度值变化范围与 11 月相近,

均为 400~500 m 之间,大于 12 月,早晨上升期为 10:00,夜间转换期为 22:00。

图 2h 2 月和图 2i 3 月边界层高度具有几乎完全一样的日变化趋势,白天时间段高度较高,50% 高度值变化范围较大,夜间时段边界层较为稳定,50% 高度值变化范围均小于 50 m,几乎不存在波动变化,但是 3 月白天 50% 高度值变化范围为 500~1800 m,远大于 2 月的 300~1400 m,说明 3 月白天空气对流强烈,而夜间较为稳定,这主要与 3 月大部分天数处于相对晴好的天气状况,底层空气温度较高产生对流使得边界层高度较高,而夜间短时间的降雨导致温度较低使得边界层结构较为稳定,早晨上升期均为 09:00,平均最大高度分别为 848 m(2 月)、1321 m(3 月),时间均为 16:00,夜间转换期分别为 21:00、22:00。

图 2j 4 月和图 2k 5 月的日变化趋势与 12 月相一致,边界层高度全天具有波动变化趋势,但是变化

范围较小。5 月全天波动变化在 100~500 m,平均最大高度值为 674 m(15:00),早晨上升期(夜间转换期)为 08:00(20:00)。4 月也具有相似的变化趋势,最大高度为 833 m(19:00),早晨上升期(夜间转换)为 08:00(20:00),但是其最大高度出现时间为 19:00 晚于其他月份。

为了更清楚的表示各月边界层高度平均日变化的规律,将结果整理如表 2。从 2015 年 7 月到 2016 年 5 月,早晨上升期时间从 8 月的 08:00 推迟到 1 月的 10:00,再提前到 5 月的 08:00,而平均最大高度值时间从 15:00 提前到 14:00,再推迟到 15:00,高度从 1520 m 下降至 520 m,又上升至 674 m,夜间转换期均出现在 20:00—21:00,该结果与 Liu and Liang^[4]利用 ARM 美国南部大平原试验数据得到的结果具有差异性,一年中其早晨上升期均为 09:00,夜间转换期为 21:00,这种差异性可能与其时间分辨率为 3 h 且分析时没有考虑观测时间有关,Zhang 等^[18]利用 2006 年 8 月和 2007 年 1 月宜昌地区加密的探空廓线得出的结果为 8 月早晨上升期为 07:00,1 月为 10:00,夜间转换期都为 19:00,该结果与本文的 8 月为 08:00,1 月为 10:00 相近,但是本文的数据时间分辨率为 1 h 优于它的 3 h,可以认为文中的结果更为可信。这种特征可以理解为夏季 8 月,太阳辐射增强,下垫面温度较高,大气较早的产生对流进入不稳定状态,早晨上升期时间较早,下垫面温度持续升高,最大高度出现时间推迟,高度较高,而 1 月,太阳辐射较弱,温度较低,底层大气需要更多的热量从稳定层结变为不稳定层结状态,因此早晨上升期较 7 月推迟,最大高度时间提前,高度值幅度较小。

表 2 大气边界层高度月平均日变化特征

时间	早晨上升期	最大高度		夜晚转换期
		时间	高度/m	
2015-07	08:00	16:00	977	21:00
08	08:00	15:00	1520	20:00
09	08:00	16:00	977	21:00
10	09:00	17:00	678	19:00
11	09:00	16:00	676	21:00
12	10:00	15:00	535	21:00
2016-01	10:00	14:00	520	22:00
02	09:00	16:00	848	21:00
03	09:00	16:00	1321	22:00
04	08:00	19:00	833	20:00
05	08:00	15:00	674	20:00

2.3 大气边界层高度的季节平均日变化

图 3(彩页)表示大气边界层高度的季节平均日变化,春季(a),夏季(b),秋季(c),冬季(d),由于 2016 年 6 月数据缺失,夏季仅包括 7,8 月。与美国国家环境预报中心 FNL 每日 4 次和欧洲气象中心 ERA-Interim 每日 8 次的 数据对比,白天时段(08:00—19:00,下同),从冬季、秋季到春季和夏季,大气边界层高度呈增大趋势,75%减去 25%的高度值也具有同样的变化特征,夜间时段(20:00 至次日 07:00,下同),高度的波动变化较小,与其他 3 个季节相比,冬季夜间的边界层高度波动变化最小,说明冬季夜间大气处于相对稳定的层结状态,该结果与 Liu and Liang^[4]利用 ARM 美国南部大平原观测试验得到的结果相一致。早晨上升期春季和冬季为 09:00,夏季和秋季为 08:00,平均最大高度出现时间春季为 16:00,高度 867 m,夏季为 15:00,1171 m,秋季和冬季分别为 781 m(16:00)、642 m(16:00)。四季中夜间转换期均为 21:00,与图 2 中各月的结果相一致。Liu and Liang^[4]给出的结果为:四季中早晨上升期均为 09:00,夜间转换期为 21:00,最大高度时间为 15:00,高度值幅度变化也是从冬季、秋季到春季和夏季呈增大趋势,均与本文结果相似。对比 FNL 和 ERA-Interim 的数据,发现白天时段两者各时刻平均值均大于观测值,而夜间时段小于观测值。夜间时段,FNL 和 ERA-Interim 的各时刻平均值与观测值差值较小,分别为 144 m、102 m,其中秋季平均差值最小,分别为 91.5 m 和 87 m,夏季最大,分别为 187 m、111 m,春季为 169 m、117 m,冬季为 130 m 和 96 m;白天时段,两者与观测平均差值较大,分别为 258 m、346 m,其中春季最大,分别为 303 m、576 m,夏季最小,为 174 m、188 m,秋季分别为 274.5 m、281 m,冬季为 320 m 和 340 m。在早晨 08:00,FNL 和 ERA-Interim 的平均值均大于观测值,但差值较小,春季、秋季和冬季 ERA-Interim 接近观测值,夏季,FNL 更接近观测值;午后 14:00 则相反:20:00,FNL 和 ERA-Interim 的平均值都小于观测值,秋季和冬季接近,差值小于 250 m,春季差值较大,夏季 ERA-Interim 更接近观测值;凌晨 02:00,两者与观测平均差值均较小,小于 100 m。

2.4 大气边界层高度的月际变化和季节变化

将每日 24 h 的边界层高度平均得到每日的边

界层高度值,得到大气边界层高度的月际变化和季节变化,将结果与 FNL 和 ERA-Interim 的数据产品进行对比。

图 4(彩页)表示大气边界层高度的月际变化。图中基于微波辐射计的观测平均值除 8 月以外都小于 FNL 和 ERA-Interim 的平均值,观测平均值 8 月最大,高度为 543 m,10 月最小,只有 262 m, FNL 和 ERA-Interim 的平均值在 8 月小于观测值,差值分别为 84 m、6 m,10 月则远大于观测值,差值分别为 171 m、191 m,这主要与 10 月数据样本天数较少,受较为稳定的天气状况影响有关。

图 5(彩页)表示大气边界层高度的季节变化箱线图,对于微波辐射计的观测值,夏季平均高度值最大为 499 m,冬季最小,只有 322 m,且变化范围小于夏季,春季和秋季次之,高度分别为 436 m、377 m,这种季节变化规律与 Baars 等^[27]和 Granados-Muñoz 等^[28]利用雷达数据得到的结果相一致, Baars 等^[27]在德国 Leipzig 地区得到的高度平均值夏季为 1800 m,冬季为 800 m, Granados-Muñoz 等^[28]分析西班牙南部 Granada 地区一年的数据得到的结果为夏季 2000 m,冬季为 1440 m,春季和秋季分别为 1700 m 和 1600 m,都大于寿县地区,这可能与 Leipzig 和 Granada 地区海拔高度较高,且为城市下垫面有关,Granada 海拔高度为 680 m, Leipzig 海拔高度小于 100 m 但大于寿县,且两者都是白天时间段的高度,而寿县地区为稻麦轮作农田下垫面,地势平坦均匀且水分含量较高也可能产生这种差异。对于 FNL 和 ERA-Interim 的数据产品,两者均是春季平均高度最大,分别为 488 m、675 m,冬季最小,分别为 422 m、452 m,夏季和秋季次之,夏季为 463 m、539 m,秋季为 442 m、482 m,3 种数据在四季中波动变化相似。

3 结论

本文利用 2015 年 7 月至 2016 年 5 月时间段寿县稻麦轮作农田区微波辐射计观测的高时空分辨率的温度廓线,结合位温梯度法计算了该站点的大气边界层高度,分析了边界层高度的日、月和季节演变规律特征,并与美国国家环境预报中心 FNL 分析资料和欧洲气象中心 ERA-Interim 再分析资料的边界层数据产品进行对比,得出以下结论:

(1)寿县稻麦轮作农田区的大气边界层高度具有明显的日变化特征,这种变化特征在晴朗天气条件下最为显著。每个月份的大气边界层高度都具有明显的日变化特征,平均值的最大上升高度,早晨上升期和最大高度时间都具有周期性变化。最大上升高度由 2015 年 8 月 1520 m 下降到 2016 年 1 月的 520 m,随后又上升至 2016 年 5 月的 674 m,伴随着早晨上升期从 08:00 推迟至 09:00 随后又提前至 08:00,最大高度出现时间从 15:00 提前到 14:00,再推迟至 15:00,这种演变规律与一年中太阳辐射的变化有关,夏季,太阳辐射强,下垫面温度高,底层大气产生对流时间快,早晨上升期较早,平均最大高度出现时间推迟且高度较高;冬季,太阳辐射弱,下垫面温度低,底层大气需要更多的热量从稳定层结变为不稳定状态,早晨上升期较晚,最大高度出现时间提前,高度较低。夜间转换时间均为 20:00—21:00。

(2)季节日变化中,从冬季、秋季到春季和夏季,大气边界层高度呈增大趋势,冬季边界层结构在夜间时段较稳定,夏季波动变化最大;白天时段, FNL 和 ERA-Interim 数据大于观测平均值且差值较大,分别为 258 m、346 m;夜间时段,则小于观测平均值且差值较小,分别为 144 m、102 m。

(3)月际变化和季节变化中,观测值 8 月平均高度最大,为 543 m,10 月份最小,只有 262 m, FNL 和 ERA-Interim 平均高度值在 8 月小于观测值,10 月则大于观测值。观测值在夏季边界层平均高度最大,为 499 m,冬季最小,只有 322 m,春季和秋季次之,分别为 436 m 和 377 m, FNL 和 ERA-Interim 则是春季平均高度最大,冬季最小,夏季和秋季次之。

综上所述,本文分析了稻麦轮作农田区大气边界层高度的日、月和季节演变规律特征,加深了对稻麦轮作农田区边界层高度特征的认识,这些特征和规律对于现有边界层高度数据库的改进以及大气模式中边界层高度模拟结果的验证都具有参考价值。然而,由于部分月份观测数据的缺失,数据样本存在局限性,我们未来将使用更长时间序列、更多站点和更多气象要素的观测资料对该区域边界层结构开展进一步的分析。

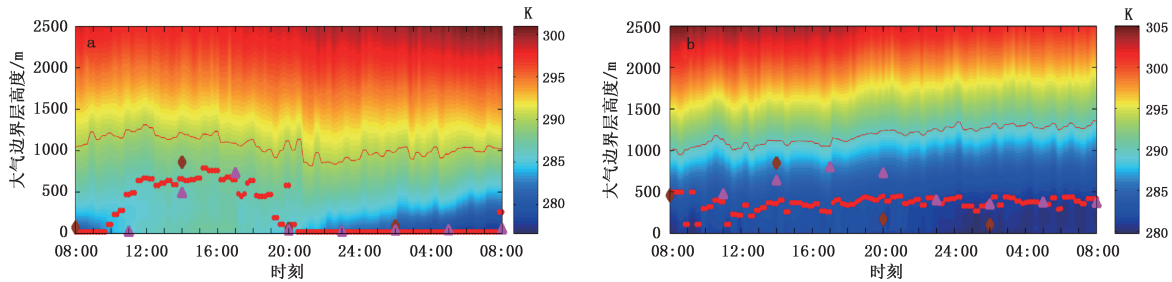


图 1 2015 年 11 月 29 日晴朗天气(a)和 2015 年 11 月 8 日阴天(b)位温廓线随时间的变化状况(填色)及边界层高度值(红色圆点表示位温廓线计算的大气边界层高度,粉色三角形表示 ERA-Interim 每日 8 次的大气边界层高度数据,褐色菱形表示 FNL 每日 4 次的大气边界层高度数据,红线表示 290 k 位温高度)

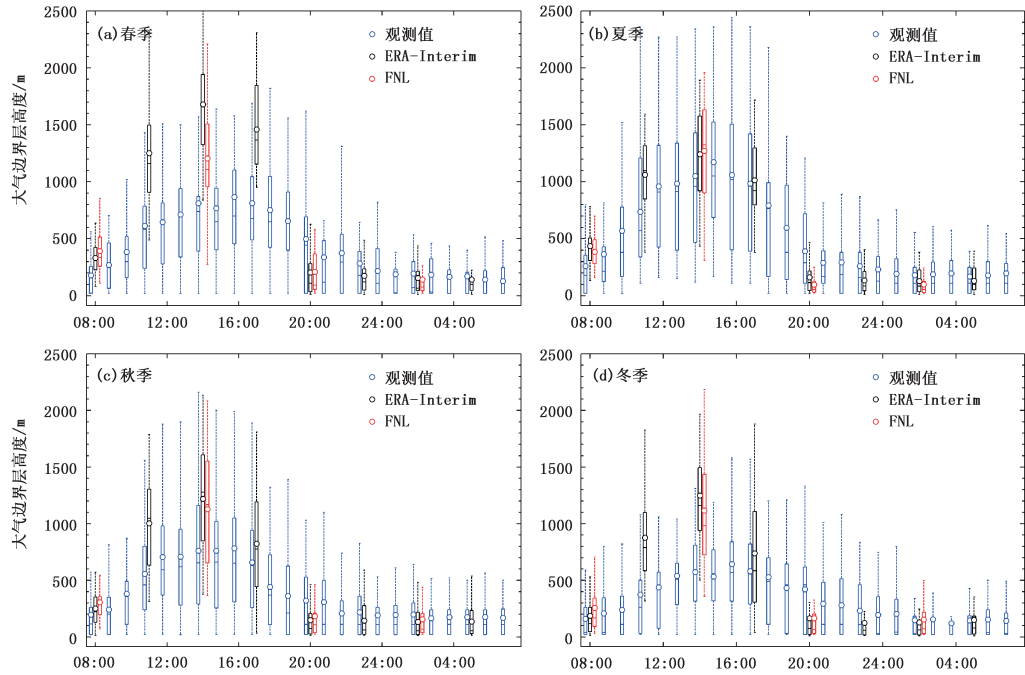


图 3 大气边界层高度季节平均日变化的箱线图:(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季(矩形盒中间横线表示中位数,矩形盒的上下边缘线分别表示 25%,75%高度值,矩形盒上下两端的外延线包含所有的数据,矩形盒中间的圆圈表示平均值,蓝色的盒子表示基于微波辐射计的温度廓线计算的边界层高度,黑色盒子表示 ERA-Interim 每日 8 次的数据,红色表示 FNL 每日 4 次的数据产品)

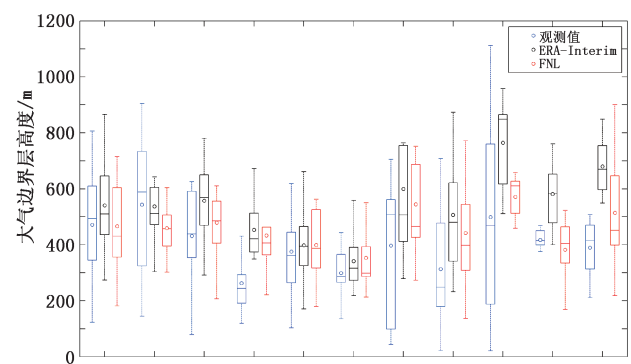


图 4 逐月平均大气边界层高度的箱线图(说明同图 3)

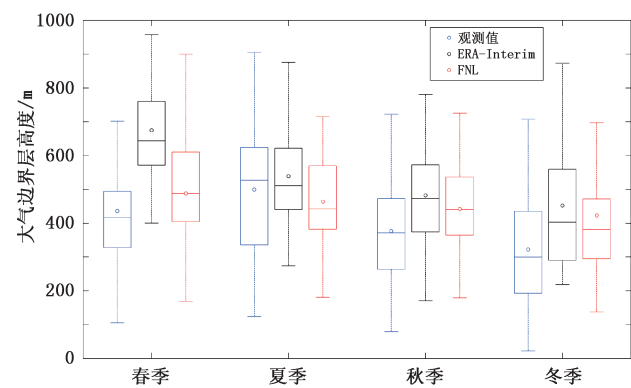


图 5 季节大气边界层高度的箱线图(说明同图 3)

参考文献

- [1] Garratt J R. The Atmospheric Boundary Layer [M]. Cambridge University Press, 1992: 316.
- [2] Huang M, Gao Z, Miao S, et al. Estimate of boundary-layer depths over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015 [J]. Bound-Lay Meteorol, 2016, DOI 10.1007/s10546-016-0205-2.
- [3] Seidel D J, Ao C O, Li K. Estimating climatological atmospheric boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis [J]. J Geophys Res, 2010, 115: D16113.
- [4] Liu S Y, Liang X Z. Observed diurnal cycle climatology of atmospheric boundary layer height [J]. J Climate, 2010, 23(21): 5790-5809.
- [5] Kamp D V D, Mckendry I. Diurnal and seasonal trends in convective mixed-layer heights estimated from two years of continuous ceilometer observations in Vancouver, BC [J]. Bound-Lay Meteorol, 2010, 137(3): 459-475.
- [6] Tucker S C, Brewer W A, Banta R M, et al. Doppler Lidar estimation of mixing height using turbulence, shear, and aerosol profiles [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2009, 26(4): 673-688.
- [7] 贺千山, 毛节泰. 微脉冲激光雷达及其应用研究进展[J]. 气象科技, 2004, 32(4): 219-224.
- [8] Bianco L, Wilczak J M. Convective boundary layer depth: improved measurement by Doppler radar wind profiler using fuzzy logic methods [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2002, 19(11): 1745-1758.
- [9] 陈浩君, 黄兴友, 王亚东, 等. 上海 TWP3 型边界层风廓线雷达探测性能评估[J]. 气象科技, 2015, 43(3): 355-360.
- [10] Lokoshchenko M A. Long-term Sodar observations in Moscow and a new approach to potential mixing determination by radiosonde data [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2002, 19(8): 1151-1162.
- [11] 陈诗闻, 潘乃先. 相控阵多普勒声雷达[J]. 气象科技, 1992(1): 77-83.
- [12] Wang Z, Cao X, Zhang L, et al. Lidar measurement of atmospheric boundary layer height and comparison with microwave profiling radiometer observation [J]. Atmos Meas Tech, 2012, 5(8): 1965-1972.
- [13] 刘建忠, 何晖, 张蔷. 不同时次地基微波辐射计反演产品评估[J]. 气象科技, 2012, 40(3): 332-339.
- [14] 张文刚, 徐桂荣, 颜国跑, 等. 微波辐射计与探空仪测值对比分析[J]. 气象科技, 2014, 42(5): 737-741.
- [15] Zhang Y, Gao Z, Li D, et al. On the computation of atmospheric boundary layer height using the bulk Richardson number method [J]. Geosci Model Dev, 2014, 7(6): 4045-4079.
- [16] Collaud C M, Praz C, Haeferle A, et al. Determination and climatology of the atmospheric boundary layer height above the Swiss plateau by in situ and remote sensing measurements as well as by the COSMO-2 model [J]. Atmos Chem Phys, 2014, 14(23): 13205-13221.
- [17] Beyrich F, Görsdorf U. Composing the diurnal cycle of mixing height from simultaneous sodar and wind profiler measurements [J]. Bound-Lay Meteorol, 1995, 76(4): 387-394.
- [18] Zhang Y H, Zhang S D, Huang C M, et al. Diurnal variations of the atmospheric boundary layer height estimated from intensive radiosonde observations over Yichang, China [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(11): 2172-2176.
- [19] 陈炯, 王建捷. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨模拟对比[J]. 应用气象学报, 2006, 17(4): 403-411.
- [20] 张鑫, 蔡旭晖, 柴发合. 北京市秋季大气边界层结构与特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(2): 220-225.
- [21] 蒋德海, 王成刚, 吴兑, 等. 利用风廓线雷达资料对广州地区边界层日变化特征的分析研究[J]. 热带气象学报, 2013, 29(1): 129-135.
- [22] Cimini D, De Angelis F, Dupont J C, et al. Mixing layer height retrievals by multichannel microwave radiometer observations [J]. Atmos Meas Tech, 2013, 6(3): 4971-4998.
- [23] Rose T, Crewell S, Löhnert U, et al. A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of the cloudy atmosphere [J]. Atmos Res, 2009, 75(3): 183-200.
- [24] Seidel D J, Zhang Y, Beljaars A, et al. Climatology of the atmospheric boundary layer over the continental United States and Europe [J]. J Geophys Res, 2012, 117: D17106.
- [25] Vogelesang D H P, Holtslag A A M. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations [J]. Bound-Lay Meteorol, 1996, 81(3-4): 245-269.
- [26] Dai C Y, Gao Z Q, Wang Q, et al. Analysis of atmospheric boundary layer height characteristics over the Arctic Ocean using the aircraft and GPS soundings [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2011, 4(2): 124-130.
- [27] Baars H, Ansmann A, Engelmann R, et al. Continuous monitoring of the boundary-layer top with Lidar [J]. Atmos Chem Phys, 2008, 8(23): 7281-7296.
- [28] Granados-Muñoz M J, Navas-Guzmán F, Bravo-Aranda J A, et al. Automatic determination of the atmospheric boundary layer height using lidar: One-year analysis over southeastern Spain [J]. J Geophys Res, 2012, 117: D18208.

Diurnal and Seasonal Variations of Atmospheric Boundary Layer Heights over Rice-Wheat Rotation Cropping Field

Liu Rao¹ Li Yubin² Gao Zhiqiu²

(1 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;
2 School of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: By using the high temporal resolution temperature profile data observed from multi-channel microwave radiometer over the rice-wheat rotation cropping field observation site at Shouxian from July 2015 through May 2016, the atmospheric boundary layer heights are calculated with the potential temperature gradient method, and the diurnal, monthly, and seasonal variation characteristics of the atmospheric boundary layer heights are studied in this paper. It is found that the atmospheric boundary layer heights have a typical diurnal variation in fine weather, which is almost in the same phase of the diurnal temperature variation. During a day, the average largest height usually appears in afternoon, with the largest value in August (greater than 1520 meters) and smallest value in January (520 meters). The atmospheric boundary layer heights also show a seasonal cycle: the smallest in winter (322 meters), and the second smallest in autumn (377 meters), the second largest in spring (436 meters), and the largest in summer (499 meters). The atmospheric boundary layer height calculated from the temperature observations is 258 meters (346 meters) greater than the value from the FNL (ERA-Interim) data during the daytime (i.e., 08:00–19:00 local time), while it is 144 meters (102 meters) smaller than the value from the FNL (ERA-Interim data) during the nighttime (i.e., 19:00–8:00 local time).

Keywords: atmospheric boundary layer height; rice-wheat rotation cropping field; microwave radiometer; diurnal variation; seasonal variation; FNL analysis data; ERA-Interim reanalysis data