

持续性霾天气与大气边界层气象条件的关系分析

杨雪艳, 杜倩, 慕秀香, 张梦远 (吉林省气象台, 吉林长春 130062)

摘要 利用地面气象观测资料以及气象探空资料, 从环流形势特点、边界层风速、逆温强度、湿度垂直分布特征、混合层高度、通风系数等方面分析了2013年1月11~17日长春市持续霾天气的气象条件。结果表明, 此次霾天气发生在高空不断有弱槽扰动、冷空气总体较弱的天气背景下, 大气边界层逆温强、风速偏小、湿度大、混合层高度持续<800 m、边界层通风系数持续<3 000 m²/s, 致使大气水平扩散能力和垂直交换能力弱, 引发了此次持续霾天气。

关键词 霾; 边界层气象条件; 逆温强度; 混合层高度; 通风系数

中图分类号 S161 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)03-240-04

Relationships between Long Time Haze Weather and Boundary Layer Meteorological Conditions

YANG Xue-yan, DU Qian, MU Xiu-xiang et al (Jilin Province Meteorological Observatory, Changchun, Jilin 130062)

Abstract Using the surface meteorological observation data and the sounding data, the meteorological conditions during the long time haze weather in Changchun Jan. 11-17, 2013 were analyzed from circulation situation, boundary layer wind speed, intensity of inversion, vertical humidity distribution, the mixed layer height, ventilation coefficient etc. The results indicated that the haze occurred in the condition of weak trough disturbances and weak cold air. Strong boundary layer inversion, low wind speed, high humidity and the mixed layer height lasts for less than 800 meters, the boundary layer ventilation coefficient lasts less than 3 000 m²/s, caused weak ability of atmospheric horizontal diffusion and vertical exchange, which lead to the persistent haze weather.

Key words Haze; The boundary layer meteorological conditions; The intensity of inversion; The mixed layer height; Ventilation coefficient

近年来霾天气显著增多, 气候变化绿皮书《应对气候变化报告(2013)》指出, 进入21世纪后, 我国中东部地区连续霾过程站次数增加显著。连续3 d、4 d、5 d、6 d的霾过程站次分别是20世纪平均值的2.8、2.9、3.0和3.1倍, 其中持续时间越长的霾过程站次数增加越多。2013年我国平均霾日数为36 d, 较常年偏多27 d, 创52年来最多。霾天气导致环境空气质量恶化, 对生态建设、社会经济发展和人民生活均会产生较大危害^[1-3]。陈仁杰等分析指出PM_{2.5}进入肺部对局部组织有堵塞作用, 可使局部支气管的通气功能下降, 细支气管和肺泡的换气功能丧失; 长期暴露于高浓度PM_{2.5}下, 可引起人群中的心肺系统疾病死亡率显著增加^[4]。因此霾以及霾的预报预警越来越受到各级政府和广大公众的高度关注。广大专家学者对于霾的成因也有较多分析^[5-8], 总体来说, 霾天气形成主要受污染排放和大气对污染物的扩散稀释能力影响。污染源是造成空气污染的根本原因, 大气对污染物的扩散能力是空气污染的直接诱因。长春市地处我国东北地区, 冬季需要采暖, 由于燃煤取暖加剧了污染物的排放, 因此一旦遇有静稳天气, 就可能出现霾。近几年长春市霾天气增多, 特别是2013年1月11~17日长春市出现了长达7 d的霾天气, 空气质量有4 d达到严重污染级别, 有3 d为重度污染, 霾持续时间之长为历史罕见。笔者重点分析此次长春市持续霾发生时的气象条件, 找出持续霾形成的气象条件, 为持续霾的预报预警提供参考。

1 资料和方法

研究选取了长春市环境监测站2013年1月11~17日逐

日空气质量观测资料以及相应时段地面风速、气温、相对湿度、气压和高空温度、风速等气象观测资料。

为研究霾与边界层大气特征的关系, 计算了相应时段逆温层高度、逆温强度、混合层高度以及通风系数。逆温层高度是指大气逆温层顶与底之间的垂直距离。逆温强度是逆温层内大气温度垂直递减率, 越大表示逆温越强, 越不利于大气污染物扩散。逆温层高度计算公式为 $th = H_1 - H_2$, 其中 H_1 为逆温层顶高度, H_2 为逆温层底高度; 逆温强度 $ITI = \Delta T / th$, 其中 ΔT 为逆温层顶减去逆温层底温度差, th 为逆温层厚度。混合层高度采用罗氏法计算^[9], 其计算公式为 $H = \frac{121}{6}(6-P)(T-T_d) + \frac{0.169P(\bar{u}_z + 0.257)}{12f \ln(z/z_0)}$, 式中, T 为地面气温, T_d 为露点温度, 单位为K; \bar{u}_z 为 z 高度处的平均风速, 单位m/s; z_0 为地面粗糙度, 单位m; f 为柯氏参数, 单位s⁻¹, $f = 2\Omega \sin\varphi$, 其中 Ω 为地转角速度, φ 为地理纬度; P 为帕斯圭尔稳定度级别(大气稳定度级别为A~F时, P 值依次为1~6)。

2 霾天气实况

2013年1月11~17日长春市出现了持续的霾天气, 首要污染物为PM_{2.5}, 期间PM_{2.5}日平均浓度在173~375 μg/m³, 空气质量指数(AQI)均在200以上, 最大达417, 12~15日空气质量等级均为6级, 连续4 d为严重污染级别, 11、16~17日为重度污染(表1)。

表1 2013年1月11~17日长春市空气质量

日期	PM _{2.5} 日平均浓度	AQI指数	空气质 量等级
	μg/m ³		
01-11	184	234	5
01-12	354	403	6
01-13	282	332	6
01-14	340	390	6
01-15	375	417	6
01-16	245	295	5
01-17	173	223	5

基金项目 中国气象局小型业务建设项目“京津冀、长三角及珠三角环境气象预报预警业务系统建设”。

作者简介 杨雪艳(1969-), 女, 吉林长春人, 高级工程师, 硕士, 从事灾害性天气预报方法和气象服务方法研究。

收稿日期 2014-12-05

3 持续霾与大气边界层气象条件的关系分析

大气对污染物的稀释、扩散能力与边界层气象条件密切相关,气象条件如风速、降水、温度、湿度以及通风系数、逆温强度、逆温层高度等对污染物的扩散、分布、稀释、迁移、转化等均会产生影响。

3.1 持续霾发生的环流背景

3.1.1 高空环流形势特征。从1月11~17日500 hPa高度距平及环流形势图上(图1)可以看出,西伯利亚到贝加尔湖为正距平中心,中心强度达12 dagpm,我国西北、华北以及东北地区西部为正距平区,日本海到我国东北地区东部为负距平区,长春市处于正、负距平交界处;期间欧亚大陆环流形势较为稳定,呈西高东低分布,从西西伯利亚到我国甘肃、内蒙一带维持一个强的高压脊,在鄂霍次克海到日本列岛中部有一个低压中心,同时也是一个冷空气中心,在中西伯利亚有一个弱低压中心及冷空气中心,长春市主要处于高压脊前,当暖高压脊略东移时,长春市就处于暖空气影响下,当北部和东部冷空气入侵高压脊前部时,长春市就受弱冷空气影响。

霾天气形成初期,正处于暖空气影响下,11日底层气温较前期明显回升,长春市750~1500 m内升温幅度平均达7.5℃,而地面由于夜间辐射降温强,升温较慢,使750 m以内逆温7℃,大气层结异常稳定。加之地面为倒槽低压,气

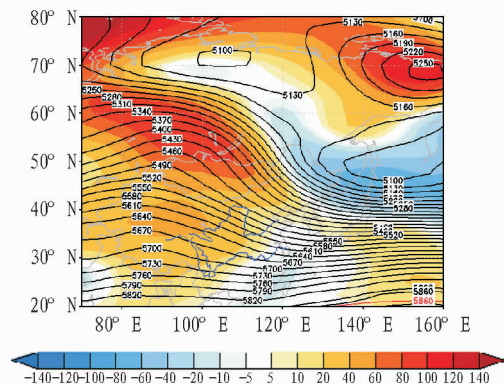
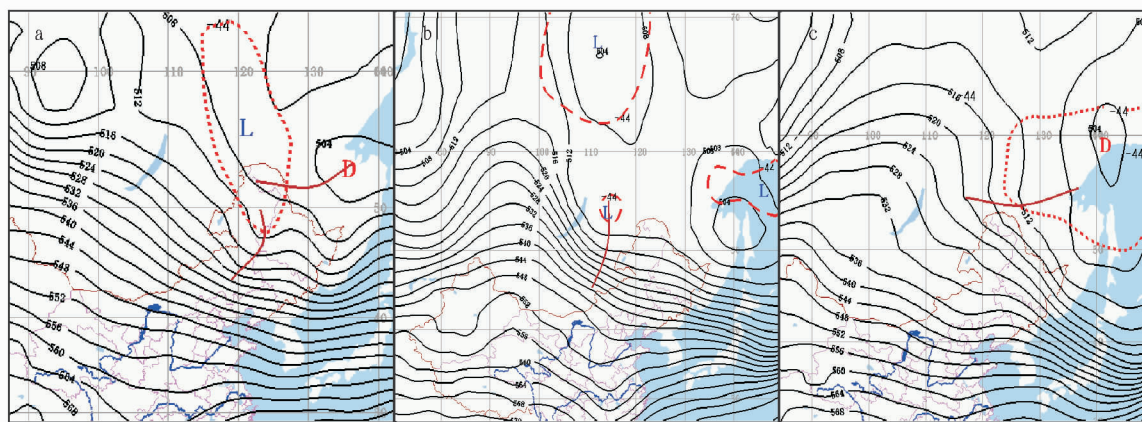


图1 2013年1月11~17日500 hPa高度场(黑色等值线)及距平场(色斑图)

压梯度小,风力小,湿度大,形成了静稳天气,很不利于污染物稀释和扩散,导致霾天气形成。12~17日期间中西伯利亚冷空气3次向西向南扩散,致使在高压脊前出现3次弱槽影响(图2),但由于此间长春市低层冷暖空气势力相近,冷空气势力弱,导致了雾霾的持续;此间850 hPa温度频繁小幅度升降,温度日变化在3℃以内,如12日下降3℃,13日升高2℃,14日又下降3℃,15日升高1℃,16日又下降2℃,17日再升高1℃,没有强冷空气影响,因此静稳气象条件持续,造成了持续霾。



注:黑色实线为等高线,红色虚线为-44℃等温度线。

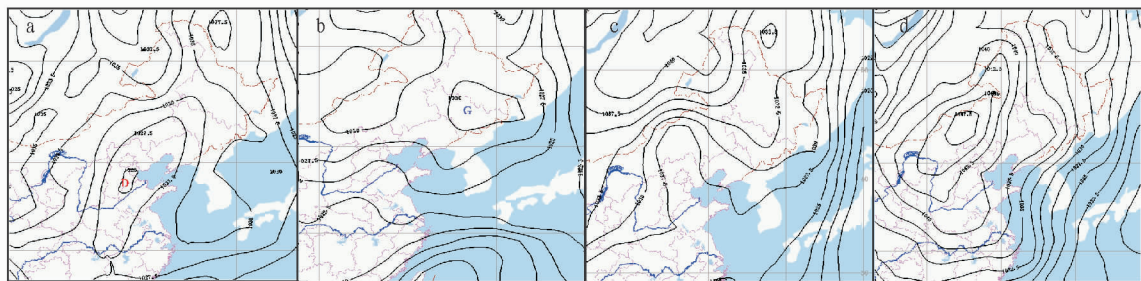
图2 2013年1月12日(a)、13日(b)和15日(c)08:00 500 hPa高度环流形势

3.1.2 地面影响系统。从地面影响系统(图3)上看,11~12日为弱低压影响,13日为高压,14~17日为倒槽影响,长春市气压梯度均比较小,因此地面风一直较小。

3.2 霾与边界层风速的关系此次持续霾发生期间(1月11~17日),长春市地面平均风速为1.7 m/s,比常年同期(3.0 m/s)减少43.3%,有5 d风速<2.0 m/s,期间每日风速均低于常年同期(图4),且为2001年以来同期风速最小的一年(图5);而同月空气质量较好的2~4日(空气质量为2级),平均风速分别为3.5、3.5和5.0 m/s,明显高于霾发生期间的地面风速。从925 hPa风速可以看出,925 hPa风速也较小,11~17日925 hPa平均风速为5.2 m/s。可见,近地层风速小,空气水平流动弱,不利于污染物水平扩散,造成了此

次持续霾天气。

3.3 霾发生时温度的垂直结构特征一般来说,大气对流层内温度随高度递减,即底层暖上层冷,有利于地面气流上升,底层空气中的污染物可以向上扩散。但在某些特殊情况下,高层气温反而高于低层气温,这种现象称之为逆温。逆温层的物理特征是下冷上暖、气体状态稳定,对气体上下对流有抑制作用,不利于大气污染物的扩散,逆温厚度越厚,持续时间越长,造成的污染越严重。赵桂香等对1994年11月发生在山西省的持续性雾霾天气过程进行分析表明,850 hPa以下相对湿度的变化是判断雾霾天气形成的基本条件;而逆温层的持续存在是雾霾天气持续的重要原因;湿度差异和逆温强度差异可作为判断大范围雾霾天气的指标^[10]。王



注:a. 11日08:00;b. 13日08:00;c. 15日08:00;d. 17日08:00。

图3 2013年1月11~17日地面气压力场

研究结果表明雾霾天气对应着低空逆温^[11]。经分析(图6),此次持续性雾霾发生期间,1 500 m高度以内温度随高度升高,即存在逆温层,1 500 m高空与地面逆温平均达 $-6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,逆温层厚度平均达1 500 m,逆温强度平均达 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,13日最强,达 $0.71\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,且每天均有逆温存在,说明这些天长春市逆温层深厚,因此严重抑制了空气中污染物的扩散。

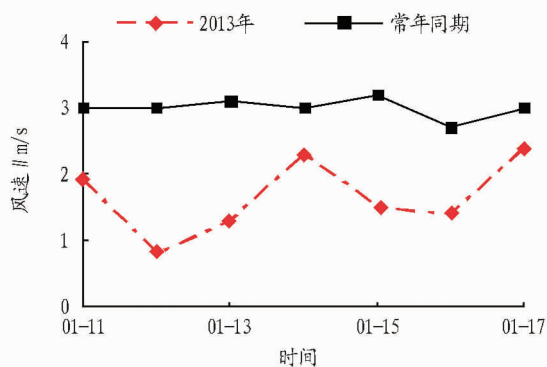


图4 2013年1月11~17日长春市日平均风速与常年同期对比

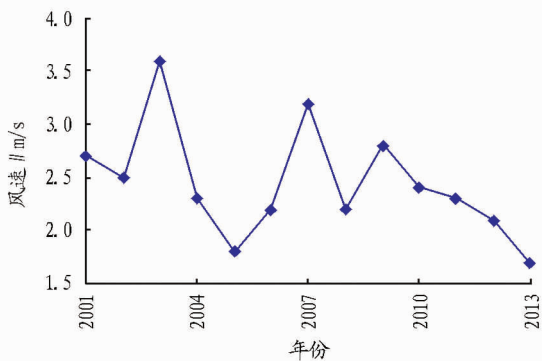


图5 2001~2013年逐年1月11~17日长春市平均风速

3.4 霾与边界层湿度的关系 湿度大,污染物粒子膨胀并互相碰并吸附,会使污染物增大,更不利于污染物稀释。这次霾发生期间湿度垂直分布是上干下湿,地面到750 m附近湿度大,特别是地面平均相对湿度为74.6%,比常年同期高8.6%,且每一天均高于常年同期(图7)。而1 500~3 000 m湿度迅速减小,3 000 m附近相对湿度仅为37%。

3.5 霾与混合层高度的关系 大气边界层中性或不稳定时,由于动力或热力湍流的作用,边界层内上下层之间产生强烈的动量或热量交换,通常把出现这一现象的层称为混合层。叶堤等研究表明月平均混合层厚度和月平均空气质量

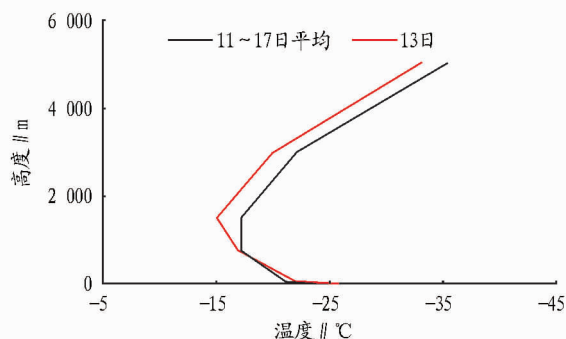


图6 2013年1月1~17日温度垂直分布

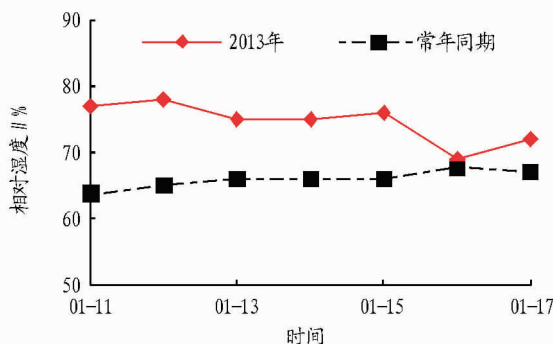


图7 2013年1月11~17日相对湿度与常年同期对比

指数(API)呈显著负相关^[12];杨静等分析乌鲁木齐混合层高度与空气污染发现,混合层高度与API相关系数为 -0.95 ,表明大气混合层高度是影响空气质量的重要因素^[13]。混合层高度存在日变化特征,即夜间低,中午前后高;文中所指混合层高度为当日日平均混合层高度,即02:00、08:00、14:00、20:00 4个时次混合层高度的平均。此次持续霾发生期间,长春市上空大气混合层高度偏低,平均混合层高度为641 m,最低为363 m。从9~18日混合层高度和空气质量AQI指数图上(图8)可以看出,混合层高度和空气质量AQI指数存在反比关系,混合层高度越低空气质量AQI指数越高,空气污染越重。9、10日混合层高度在830~870 m,AQI指数低于200,11日混合层高下降至724 m,AQI指数达234,开始出现重度污染天气;12日混合层高度下降至363 m,当日AQI指数达403,开始出现严重污染天气;12~16日混合层高度均在800 m以下,AQI指数达295~417,均为严重污染天气;17、18日混合层高度分别上升至917和1 100 m,而AQI指数下降至223和191。

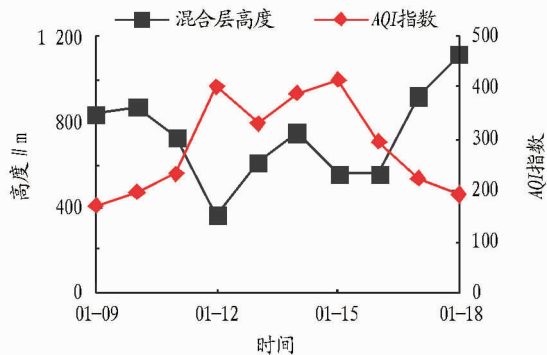


图8 2013年1月9~18日长春市混合层高度及AQI指数对比

3.6 霾与通风指数的关系 通风系数是反映大气边界层内通风情况的物理量,值越小越不利于污染物扩散。此次持续霾发生期间,长春市边界层内通风系数较小。从9~18日边界层通风系数和空气质量AQI指数对比(图9)可以看出,通风系数越小空气质量AQI指数越高,空气污染越重。9、10日边界层通风系数 $>3000\text{ m}^2/\text{s}$,AQI指数低于200;11日通风系数减小至 $2500\text{ m}^2/\text{s}$ 以下,AQI指数上升,开始出现重度污染天气;12~16日期间,通风系数均在 $3000\text{ m}^2/\text{s}$,AQI指数均高于200,特别是12和15日,通风系数很小,分别为 780 和 $1116\text{ m}^2/\text{s}$,而AQI指数分别达403和417;17日通风系数

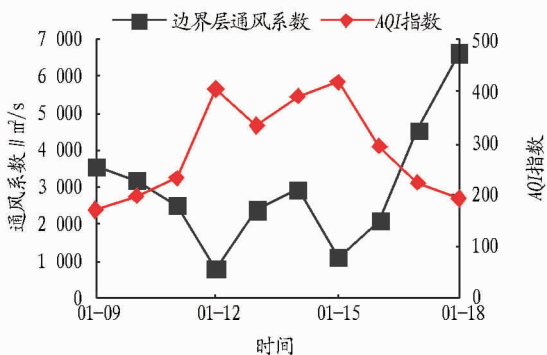


图9 2013年1月9~18日长春市通风系数及AQI指数对比图

(上接第237页)

计算阈值是可行和安全的。

表2 疑误数据占总记录百分率

深度 cm	$X_1=1$ 时 百分率//%	$X_2=2$ 时 百分率//%	$X_3=3$ 时 百分率//%	无偏差 %	X_1-X_3 时 百分率//%
10	19.06	18.28	17.83	24.50	1.23
20	6.13	6.12	6.12	9.30	0.01
30	15.16	14.18	12.08	17.00	3.08
40	11.36	11.07	10.67	12.70	0.69
50	11.35	10.73	10.14	13.10	1.21

5 小结

(1) 土壤水分自动站资料仅局限于本地应用入库前的质量控制,而上传中国气象局的资料没有进行质控。

(2) 资料随降水因子时变检查尚未考虑,土壤水分自动

增大,AQI指数开始大幅度降低,18日随着通风系数进一步增大至 $6000\text{ m}^2/\text{s}$ 以上,AQI指数下降至200以下。

4 结论

(1) 高压脊前不断有弱槽扰动,但冷空气弱,小幅度冷暖变化频繁,当高空回暖时,由于地面夜间辐射降温强,地面温度仍然较低,致使大气逆温强,逆温层厚;加之地面气压梯度小,导致持续静稳天气。持续静稳天气严重抑制了污染物的扩散,引发了持续霾天气。

(2) 混合层高度持续低于 800 m ,大气湍流交换能力持续偏弱,导致霾天气持续。

(3) 边界层内风速小,通风能力弱,通风系数持续 $<3000\text{ m}^2/\text{s}$,空气水平流动慢使污染物水平扩散能力差,也是导致此次霾的重要原因。

参考文献

- [1] 郝明辉. 浅谈雾霾天气形成的前期原因与防治对策[J]. 能源与环境科学,2013(2):176.
- [2] 金均,吴建,蔡菊珍,等. 杭州市灰霾天气基本特征及成因分析[J]. 环境污染与防治,2010,32(5):61-63.
- [3] 郭新彤,魏红英. 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报,2013,58(13):1171-1177.
- [4] 陈仁杰,阙海东. 雾霾污染与人体健康[J]. 自然杂志,2013,35(5):342-344.
- [5] 吴庆梅,张胜军. 一次雾霾天气过程的污染影响因子分析[J]. 气象与环境科学,2010,33(1):12-16.
- [6] 王淑英,张小玲. 北京地区PM10污染的气象特征[J]. 应用气象学报,2002,13(S1):177-184.
- [7] 陈训来,冯业荣,王安宇,等. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2007,46(4):103-107.
- [8] 靳利梅,史军. 上海市雾霾天气气候特征分析[J]. 高原气象,2008,27(S1):138-143.
- [9] 孟庆珍,冯艺. 成都大气混合层厚度的计算和分析[J]. 成都气象学院学报,1996(1):73-81.
- [10] 赵桂香,杜莉,卫丽萍,等. 一次持续性区域雾霾天气的综合分析[J]. 干旱区研究,2011,28(5):871-878.
- [11] 王丽. 郑州市雾霾天气的低空气象要素特征分析[J]. 河南科技,2013(2):173.
- [12] 叶堤,王飞,陈德蓉. 重庆市多年大气混合层厚度变化特征及其对空气质量的影响分析[J]. 气象与环境学报,2008(4):41-44.
- [13] 杨静,李霞,李秦,等. 乌鲁木齐近30a大气稳定性和混合层高度变化特征及与空气污染的关系[J]. 干旱区地理,2011,34(5):747-752.

站无降水要素采集也是解决此问题的难点。

(3) 宁夏土壤水分自动站业务根据需求在增设安装,因此,质量控制工作同样需要根据实际情况补充完善,更需要投入业务试运行检验优化。

参考文献

- [1] 宁夏自动土壤水分观测站试运行评估报告[R]. 宁夏气象局,2012:1-7.
- [2] 自动土壤水分规范(试行)[S]. 中国气象局综合观测司,2010:1-3.
- [3] 孙林花,李仲龙,杨斌,等. 甘肃省区域站实时气象资料质量控制与问题分析[C]//第二届全国气象观测技术经验交流会文集. 北京,2012:39-44.
- [4] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京:气象出版社,1993:78-83.
- [5] 李志鹏,张玮,黄少平,等. 自动气象站数据实时质量控制业务软件设计与实现[J]. 气象,2012,38(3):373-375.