

地温观测方法的研究

邹耀芳 张纬敏 王金钊 高淑东

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

利用铂、铜、热敏3种电阻传感器的遥测地温仪与台站现用玻璃地温表,在不同天气条件下,用不同安置方法进行大量的对比试验,探讨地面、草面、地中不同深度温度的最佳观测方法。得出:地面温度应用体积小棒状传感器的多点采样平均来代替单点一次采样;地中温度表用直埋式与套管式无大差异;草温为农业服务有重要意义等结论。为遥测地温的观测方法提供科学依据。

关键词: 地温观测方法 遥测地温仪 地面温度 地中温度 草温

前 言

从50年代初至今,我国一直采用前苏联的地温观测方法。几十年来,在观测实践中虽然发现不少问题,但由于地温观测问题复杂,研究难度大,以及设备等条件的限制,所以我国在地温观测方法方面,还无人进行过系统的研究。

气象台站现用的地温仪器,仍然是玻璃液体温度表。利用这种地温仪器和目前所用观测方法获得的地温资料,其准确性、代表性、比较性,都存在较大的问题,已无法满足业务和科研工作的需要^{[1],[2]}。

气象参数在空间-时间上较大的易变化性,无论是对观测方法还是传感器大小形状,都提出了特殊的要求,就遥测地温仪而言,亦复如此。比如,元件形状和结构、埋设方式、采样方法和次数、数据处理、观测时次等等,都需要先做观测方法的试验研究,再在技术上加以实现,否则必然是事倍功半。

为了提高地温观测的准确度,适应今后业务发展需要,我们对地面温度的确切含义、遥测地温仪的观测方法,以及能否用遥测地温仪代替玻璃温度表等问题,进行了针对性的试验,取得了大量的数据,得出比较重要的结果。

1 试验方法设计

1.1 仪器设备

选用4种地温仪进行对比试验。

1.1.1 玻璃水银温度表(以下简称玻表)。选用精度高的3支地面玻表和一支40cm地中玻表,这些表都经过检定,试验过程中,用它作为相对标准。

1.1.2 试验用3种遥测地温仪(下统称电阻表):铂电阻遥测地温仪(下称铂表)、半导体热敏电阻遥测地温仪(下称热敏表)及铜电阻遥测地温仪(下称铜表)。3台地温仪均配有显示和打印装置。感应元件的外形、大小和玻表一样,并有金属电镀外壳,滞后系数与玻表相近。3种电阻表均经过检定。

1.2 场地设计

1.2.1 在北京中国气科院大气探测所楼前的观测场内,开出了 $1.5 \times 1.0\text{m}^2$ 的裸地作为地面温度的试验场地(见图1)。图中:

(a)为0cm半埋式。各种仪器的感应元件均按规范规定,一半埋入土中。玻表头部朝东,3种电阻表各3支元件环绕玻表头部呈半圆形放射状相间埋设。

(b)为0cm接触式。4种表各一支相对埋设,元件下部与地表接触,但不埋入土中。

(c)不接触式(刚刚离开地面)。将铂、热敏、铜表各一支,架设成感应部分刚刚离开地面的状态。

(d)离地1cm。将3种电阻表各一支,架设在离地1cm高处。

1.2.2 在裸地北面的浅草地上(见图1中(e)),埋设了两根40cm深的地中温度表套

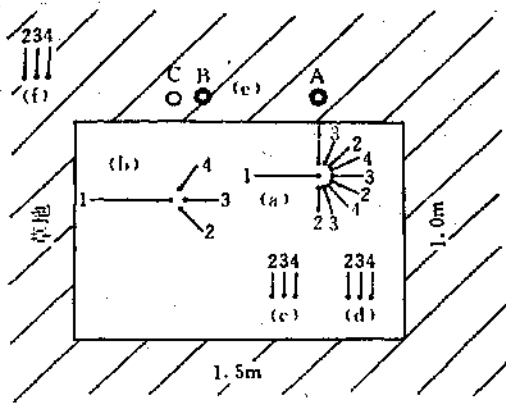


图1 试验场地示意图

1. 玻表, 2. 铂表, 3. 热敏表, 4. 铜表

管, 两管相距 50cm。在东边的套管 A 内, 安放 40cm 玻表。西边套管 B 内, 装有铂、热敏、铜表元件各一支(电套管式)。紧靠 B 管外侧 C 同深度的土中, 直接埋入铂、热敏、铜表元件各一支(直埋式), 为了使 B、C 与 A 感应部分一致, 三支元件固定在特制的铜管内, 四周用铜屑填满并封口。

1.2.3 草温。在裸地西北角的草地上(见图 1 中(f)), 在离地 5cm 高的草面处, 架设铂、热敏、铜表元件各一支。

1.2.4 多点地面温度试验土箱。为减少因场地条件、土壤颗粒不匀等差异造成的误差, 以保证在尽可能一致的条件下进行各种仪器性能的比较及观测方法的研究, 我们使用了特制的土箱。土箱面积为 $1.0 \times 0.8 \text{m}^2$, 土层厚 10cm。箱内用土事先经过磨细, 过筛。用毛刷平整, 使 4 种仪器各 3 支表以保持完好一致的半埋状态。

1.3 试验、采样方法

对比试验观测除在规定的正点进行外, 还视天气条件和采样需要, 随时加密观测。

玻表为人工观测, 与各电阻表的采样同步进行。电阻表均按 0cm 半埋式、0cm 接触式、刚离地式、地上 1cm、地中 40cm 及草温的顺序进行采样, 并显示、打印。所得数据均做器差订正。

2 地面温度观测方法的试验结果

地温观测中以地面温度的观测难度最大。因为一种观测方法的确定, 首先取决于对

被观测对象的正确理解。究竟什么是“地面 0cm 温度”? 使用什么样的仪器, 怎样埋设元件, 才能较真实地反映出地面的热状况? 这是研究和资料使用部门极为关注的问题。

2.1 单点测温与多点测温的比较

利用裸地及土箱中的 0cm 半埋式地温资料统计分析。

2.1.1 各地温表的 3 个元件所测得的温度值之间的比较

用各地温表每次采样所得的 3 个温度值, 彼此相减可得出 3 个差值 $|\Delta t|$, 选其最大者 $|\Delta t|_{\text{最大}}$ 求出总体的平均差值 $|\Delta t|_{\text{大}}$ (裸地 $n=60$, 土箱中 $n=115$)。结果见表 1。

表 1 各种地温表(0cm 半埋式)3 支表之间的差值/°C

差值	玻表		铂表		热敏表		铜表	
	裸地	土箱	裸地	土箱	裸地	土箱	裸地	土箱
$ \Delta t _{\text{大}}$	—	0.67	1.07	0.49	0.42	1.01	0.57	1.34
$ \Delta t _{\text{最大}}$	—	2.2	3.3	2.7	1.2	4.2	2.2	3.9

从表 1 数据可见, 在面积不大的范围之内, 由于其安装位置、方向以及土壤状况(颗粒大小, 紧密程度)的不同, 造成吸收辐射热能的差异, 以至于同一台站地温仪的 3 个传感器所测得的温度之间, 也可能相差几度。

从单点温度与平均温度点聚图(图 2)可见, 随着温度的升高和太阳辐射影响的增强, 单点温度离开平均温度的分散度明显增大, 当温度超过 20°C 以后, 单点温度的代表性显著降低。

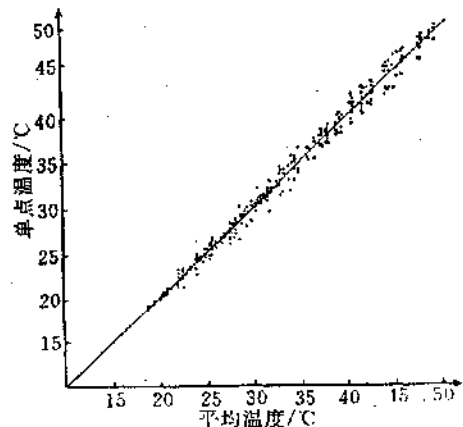


图 2 铜电阻地温表单点温度与平均温度点聚图

2.1.2 单点测温与多点测温的相关及误差比较

以玻表为相对比较标准,对裸地的各电

阻表的单点和多点测温进行误差分析。表2为玻表与各电阻表的偏差。表3为相关及回归分析。

表2 玻表与各电阻表温度的偏差/°C

差值	玻表-铂表		玻表-热敏表		玻表-铜表	
	玻单-铂单	玻单-铂平	玻单-热单	玻单-热平	玻单-铜单	玻单-铜平
平均偏差 $\bar{\Delta}$	1.83	1.37	1.45	1.35	0.97	0.93
算术平均偏差 $ \bar{\Delta} $	2.15	1.65	1.63	1.53	1.16	1.08

注:表中铂平、热平、铜平为各仪器3个传感器温度的平均值

表3 玻表与各电阻表的相关系数及回归方程

	相关系数R		回归方程 $\hat{y}=a+bx$	
	玻单-电单	玻单-电平	玻单-电单	玻单-电平
玻表-铂表	0.9813	0.9894	$\hat{y}=6.1798+0.7088x$	$\hat{y}=4.7925+0.17759x$
玻表-热敏表	0.9882	0.9918	$\hat{y}=4.1467+0.7964x$	$\hat{y}=4.0458+0.8037x$
玻表-铜表	0.9965	0.9968	$\hat{y}=3.6345+0.8326x$	$\hat{y}=2.8767+0.8617x$

从表2、表3及玻表与铂表的线性回归曲线(图略)可见,无论从玻表的偏差分析,还是相关回归分析,单点所测温度均不如3点的平均温度。说明取多点平均温度优于单点温度。

2.2 不同埋设方法——半埋式与接触式的比较

1987年9月间,在裸地上进行了半埋式 t_b 与接触式 t_c 的地面温度试验。从各种地表温度的日变化及玻表对各电阻表的比较分析(表4),都反映了两种埋设方法结果的明显差异。

表4 玻表与各电阻表温度之差/°C

埋设方式	玻表-铂表	玻表-热敏表	玻表-铜表
半埋式 t_b	5.5	5.3	3.1
接触式 t_c	0.3	-1.6	1.2

注:本表为9月14日11时太阳辐射很强时的资料

由于不同的埋设方法使元件接触土壤和暴露在空气中的体积大小不同,从而产生测温结果的显著差异,之差有的竟达7.1°C。

由此提出,究竟哪一种埋设方式能较真实地反映地面热状况的温度值?这是一个需要深入研究的问题。利用图3a、b的资料进一步分析,可以看出,在无风晴热天气,辐射增强土壤吸热时,接触式温度表所测得的温度 t_c 高于半埋式所测得的温度 t_b ,即 $t_c > t_b$ (见

图3a),同时,接近土壤表层的空气温度(用刚离地面的温度表测得的 t_x)也较高。由图4可见,最高温度出现在土壤表面。这时半埋式温度表不能真实地反映出土壤表面吸热的状况。夜间,当土壤散热时,则出现 $t_c < t_b$ 的情况(图3b),这是因为空气温度的降低比土壤温度的降低要快,而接触式比半埋式受气温影响较大的缘故。这时接触式温度表就不能反映土壤表面散热的状况了。

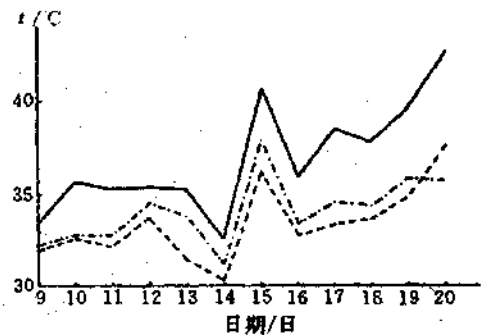


图3a 9月9—20日热敏电阻温度表14时 t_b 、 t_c 、 t_x 比较

断线:0cm半埋式温度 t_b ;实线:0cm接触式温度 t_c ;点划线:刚离地面温度 t_x

上述结果和参考文献[3]进行的地面温度的试验结果大体上一致。该文指出,当辐射增热时,吸收辐射主要部分的那个表面,应当有最高的温度。而实验证明,最高温度并不完

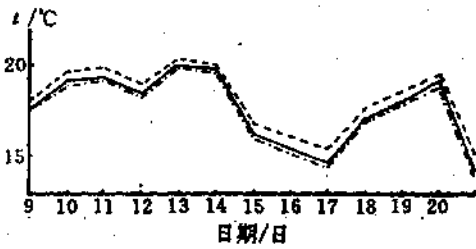


图3b 9月9—20日热敏电阻温度表02时 t_b 、 t_s 、 t_g 比较
说明同图3a

全集中在表面(特别是在大颗粒的土壤中),说明了辐射能的吸收是发生在一定厚度的一层中。因此,提出最好用“活动层”的概念代替土壤表面的概念,以“活动层”的平均温度代替表面温度。我们的实验结果也证实“活动层”提法是合理的。

直接与土壤表面相连的层次中,空气温度的梯度相当大。这可以从图4看到,在离地面约1cm左右的高度内,空气温度变化剧烈,

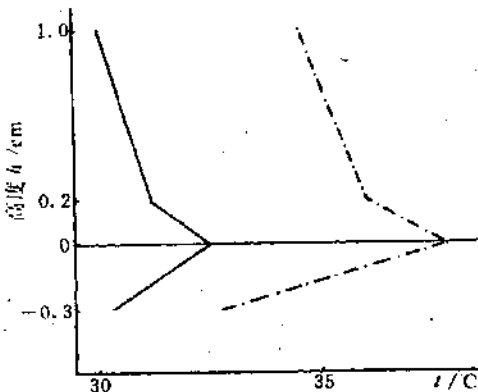


图4 地面及贴地层温度分布
实线:9月14日14时(球部无光照)
点划线:9月18日11时(球部有光照)
纵坐标:1.0和0.2分别代表离地1cm和刚离地温度表球下部高;0和0.3分别为0cm接触式温度表球下部位置和0cm半埋式温度表球下部深度

尤以0.4cm以下为甚。半埋式和接触式的感应部分一半或全部暴露在贴地层的空气之中,这一层又恰恰是气温变化剧烈的层次,因而它们受贴地层气温的影响甚大,而不能真实地反映土壤表面温度。

根据上述的试验与分析,我们认为,接触式和半埋式方法都不大可能真实地反映地表面的热状况。因此,仪器感应元件不宜太大,应采用细的棒状感应元件,埋设时,应使元件的上边缘与土壤表面持平。这种埋设方法优点是:①减少贴地层空气温度变化的影响;②减少辐射误差;③减少因埋设方位不同造成的误差;④和热电偶等小型元件比,容易保持其原来的埋设状态。

2.3 玻璃地温表与遥测地温表的比较

为了解决今后气象台站的业务工作中用遥测地温仪取代玻璃地温表的问题,以玻表为相对标准,对各电阻表进行相关及偏差分析。按规范要求,埋设方式仍采用半埋式。

2.3.1 各电阻表对玻表的偏差、相关及回归分析

计算各电阻表对玻表的算术平均偏差 $\overline{|\Delta t|}$ /°C、平均偏差 $\overline{\Delta t}$ /°C以及差值的均方差 σ /°C。其结果是:在土箱中取多点平均值温度, $\overline{|\Delta t|}$ 各电阻表均 $\leq 0.5^\circ\text{C}$, $\sigma \leq 0.52^\circ\text{C}$;裸地的 $\overline{|\Delta t|}$ 较大达 1.65°C , $\sigma \leq 1.72^\circ\text{C}$,极差达 5.5°C , $\sigma \leq 1.72$ 。土箱与裸地结果的差别,主要是由场地条件的不同和安装的差别等因素造成的。

表5列出电阻表与玻表的相关系数 R 、一元线性回归方程 $\hat{y}=a+bx$ 。

为证明玻表与各电阻表测值是否相关及相关程度如何,进行了相关性检验。

裸地资料取自由度 $n_1=1, n_2=n-2=58$,检验标准 $\alpha=0.01$,查 F 分布临界值表,得 $\lambda=7.10$;

土箱资料取自由度 $n_1=1, n_2=n-2=473$,检验标准 $\alpha=0.01$,查 F 分布临界值表得 $\lambda=6.69$ 。

表5 电阻表与玻表的相关系数及回归方程

		玻表-铂表	玻表-热敏表	玻表-铜表
R	裸地	0.9894	0.9918	0.9968
	土箱	0.9993	0.9994	0.9995
y	裸地	4.7925+0.7759x	4.0458+0.8037x	2.8767+0.8617x
	土箱	-0.3752+1.0002x	-0.3506+1.0114x	-0.2591+0.9994x

就玻表与各电阻表的数据,计算得到 F 值,无论是裸地还是土箱, F 值均远大于临界值 λ (即 $F_1 \gg 7.10, F_2 \gg 6.69$)。因此,根据数理统计理论^[4]得出:在检验标准 $\alpha=0.01$ 时, $F > \lambda$,表明玻表与各电阻表温度统计量存在高度显著的线性相关。

2.3.2 对总体平均值的假设检验

试验得出,土箱中各电阻表偏差频率分布均呈正态分布,因此,可以对它们的温度总体平均值进行假设检验(“ u ”检验)。裸地的偏差频率分布虽不及土箱的理想,但当样本容量很大时(超过 30 次),其样本平均值近似服从正态分布,也可以用“ u ”检验法进行检验。计算、检验结果如表 6 所示。

表6 各温度表总体平均值的“ u ”检验

	场地	玻表	铂表	热敏表	铜表
$\bar{t}/^{\circ}\text{C}$	裸地	27.5	26.1	26.2	26.6
(平均温度)	土箱	38.1	37.7	38.2	37.8
σ	裸地	6.97	5.46	5.65	6.02
(均方差)	土箱	14.1	14.1	14.3	14.1
u	裸地		1.22	1.12	0.76
(计算值)	土箱		0.44	-0.11	0.33

设检验信度 $\alpha=0.05$,由正态分布表查到 $u_{\alpha}=1.96$,用计算所得的 u 值与 u_{α} 比较,当 $u_{\alpha} > |u|$ (计算 u 的绝对值)时,即认为两统计量无显著差异。由表 6 可知,无论裸地还是土箱中,各温度表的计算 u 值均小于 $u_{\alpha}=1.96$,表明:从气候平均值的角度要求^[5],可以认为,由 3 种电阻表所取得的平均温度与玻表的平均温度无显著差异。因此,可以用它们代替由玻表测得的平均温度值。

3 地中温度表埋设方法的对比试验

试验选择了深层地温中温度变化较大的 40cm 深度来进行不同埋设方法的比较试验,试验按图 1e 排列。

3.1 各电阻温度表两种埋设方法的比较

对安置于套管内外的电(套)、电(直)的温度数据,进行了算术平均偏差 $|\overline{\Delta t}|$ 、平均偏差 $\overline{\Delta t}$ 及其范围、均方差 σ 的统计,结果见表 7。

表7 40cm 深套管式与直埋式电阻温度表的偏差/ $^{\circ}\text{C}$

套管式-直埋式	$ \overline{\Delta t} $	$\overline{\Delta t}$	差值范围	σ
铂表	0.13	-0.13	-0.3—0.0	0.08
热敏表	0.21	0.21	0.0—0.4	0.09
铜表	0.17	-0.17	-0.4—0.1	0.10

分析表 7 数据,各电阻温度表套管式与直埋式测得的 40cm 地中温度的算术平均偏差均 $\leq 0.2^{\circ}\text{C}$,且差值的稳定性都较好。

3.2 玻璃温度表与各电阻温度表的比较

以现行的套管式玻璃温度表分别与套管式和直埋式电阻表温度表进行比较。

3.2.1 玻(套)与电(套)相比,各表的算术平均偏差 $|\overline{\Delta t}| \leq 0.2^{\circ}\text{C}$,且铂表、热敏表均 $< 0.1^{\circ}\text{C}$ 。差值范围各表不一,最大差值为铜表的 $+0.4^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.2 玻(套)与电(直)相比,各表的 $|\overline{\Delta t}| \leq 0.2^{\circ}\text{C}$,最大差值为热敏表的 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 。

上述试验证明,采用遥测地温表测深层地温时,套管式和直埋式两种方法都不致产生太大的偏差,都可以代替现用套管式玻璃温度表。

4 3 种遥测地温仪在气象台站对比试验

为考核遥测地温仪是否适合气象台站业务使用要求,将 3 种电阻表按规范要求,安置在上海、保定两地观测场内,与台站现用玻璃地温表进行一年(1987 年 6 月—1988 年 5 月)对比观测试验。以玻表为相对标准求出不同深度玻表与电阻表的算术平均偏差 $|\overline{\Delta t}|$ (见图 5)。

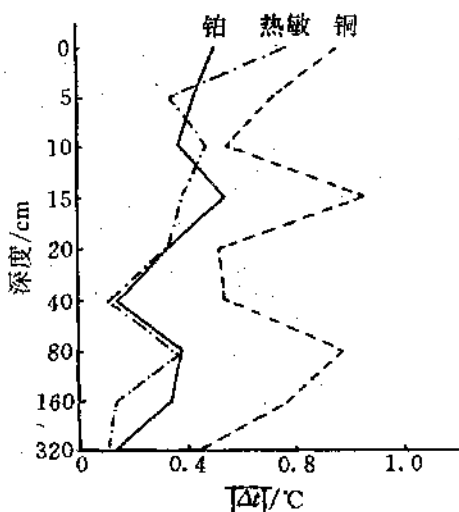


图5 上海龙华站不同深度地温算术平均偏差 $\overline{|\Delta t|}/^{\circ}\text{C}$

保定不同深度 $\overline{|\Delta t|}$ 变化趋势基本与上海相同。从图5看出,台站现用地温表与遥测电阻地温表在实际使用中存在一定偏差。其原因是复杂的。如台站地温观测时间与遥测地温仪打印时间不完全同步;两者仪器结构性不同;玻表读数的人为误差;以及遥测地温仪传感器和记录器存在缺陷等。由于上述资料是一年中上千个观测数据算术平均的结果(删去明显错误),因此它还是能反映3种电阻地温仪的误差大小。从图5资料分析得出: $\overline{|\Delta t|}$ 随深度增加逐渐减小,40cm深的差值 0.2°C 与北京试验的结果基本一致。3种电阻元件中以铂电阻、热敏电阻较好,铜电阻较差。此外还对3种元件使用前进行检定,一年后复检,从大量检定数据也得出铂电阻精度最高。进一步证明铂电阻是理想的测温元件,它的测温范围也宽,这与理论相一致。

5 草温试验

过去,在气象台站曾进行过草温的测定,以后取消了这个项目。从调研得知,有关部门更为关心一定高度的植被温度。我们利用遥测地温仪,设定了离地5cm高的草温观测,它与地面温度同步采样、打印,以了解地面温度与草温的变化关系。

选用1987年9月9—11日的资料绘制了地面及草温等日变化图(图6)。由图可见,草温的日变化趋势与地面温度及贴地层气温一致,但它的日变幅却大于地面及贴地层温度。在9—11日中,最高温度点上,草温高于地面温度(半埋式) 3°C 以上;而在最低温度点,草温低于地面温度近 2°C 。可见,不能简单地用地面温度去代替草温的测定(如在霜冻预报服务中)。在为农业部门服务需要的地区,应增加草温的观测项目。

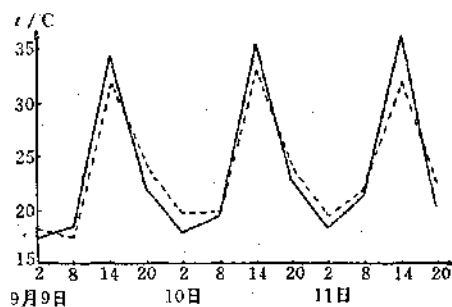


图6 地面温度与草温日变化曲线
实线,离地5cm草温,断线,半埋式地面温度

6 结论

综上所述,这次试验是国内首次对地温观测方法进行系统、全面的研究。通过大量试验得出以下结论:

6.1 统计证明,从气候学角度要求,遥测地温表获得的地温资料的总体平均值与玻璃温度表的地温资料总体平均值无显著差异。因此,可以用遥测地温表代替玻璃温度表进行地温测定,为地温实现遥测提供了可靠依据。

6.2 从40cm地中温度表的套管式和直埋式的比较试验得出:它们的偏差 $\overline{|\Delta t|} \leq 0.2^{\circ}\text{C}$,且差值稳定。解决了两种埋设方法长期争议的问题。但从安装与维修考虑,深层地温表还是采用套管为好。

6.3 试验表明,草温与地面温度存在明显差异,而草温是为农业服务的一项重要资料,因此,建议今后增加该项观测。

6.4 鉴于地表状态的非均一性与复杂性,地表水平方向的温度分布是不均匀的。试验也证明,多点测温取平均值比单点测温更有代表性。建议今后采用遥测地温仪时,宜采用直径较小,细长棒元件,浅埋土壤表层,尽可能以多点(不少于3点)、多次取平均的采样方法代替单点、一次采样。

6.5 遥测地温仪实现了地温观测的自动化,有利于观测方法的改进,减轻观测员劳动强度,而且提高了资料的客观性,解决了部分地区冬季及初春浅层地温的缺测问题,以及由于仪器、方法造成的长期未能解决的地面最高温度与地面温度的矛盾等问题。

6.6 铂电阻是理想测温元件,要使遥测地温仪能真正投入业务使用,关键搞好仪器的可靠性与稳定性。

此外,通过试验进一步感到地面温度的测量是一个非常复杂、困难的问题。“地面温度”这一概念是含糊不清的,要实现准确的测

量又是十分困难的。因此世界气象组织(WMO),没把地面温度列入观测项目^[6],但考虑到该资料代表下垫面热状况的重要性,以及保持观测资料的连续性,提高地面温度观测的准确性,除采用上述的观测方法外,还可探索其他可能途径来获取地表温度,以满足不同的需要。

参考文献

- 1 关于地温观测问题的讨论. 气象, 1983年第3—11期.
- 2 裴步祥. 关于地面温度的测定方法和仪器. 气象, 1983年第11期.
- 3 О. И. Рожанская. 关于土质表面温度测量方法的问题. 农业物理研究方法、仪器和措施. 北京: 人民教育出版社, 1960.
- 4 陈家鼎等编. 概率统计讲义. 北京: 人民教育出版社.
- 5 屠其璜等编. 气象应用概率统计学. 北京: 气象出版社, 1984.
- 6 国家气象局气候监测应用管理司翻译. WMO《气象仪器和观测方法》. 北京: 气象出版社, 1992.

Study on Method of Ground Temperature Measurement

Zou Yaofang Zhang Weimin Wang Jinzhao Gao Shudong

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Using platina, copper, thermosensitive resistors as sensors together with telemetering instruments ground temperature is measured and compared with that measured with standard glass ground thermometers under different weather conditions and sensor disposition. The best temperature observation method for ground and grass surface and at different depth under ground is discussed.

The conclusion is that ground temperature should be measured by stick-shaped sensors of small size and, single point sampling should be substituted by averaged multiple point sampling. There is no obvious difference between directly buried and tubed buried. Grass temperature is of great importance to the agriculture service.

Key Words: ground temperature observation method ground temperature telemeter ground surface temperature grass temperature