

全国80cm地温分布特征和基于太阳辐射的预测方法

倪敏莉¹ 韩乐琼² 赵鲁强¹

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2 象辑知源科技有限公司, 北京 100081)

摘要: 利用2001—2010年全国80cm层的逐日平均地温资料, 分析了全国地温的时空分布规律; 同时结合太阳辐射资料, 分析太阳辐射和地温的相关性; 将太阳辐射作为预报因子, 构建地温预报模型。结果表明, 各海拔高度的地温呈现相同的季节变化, 在夏季达到波峰, 春季降到波谷, 并且多年演变趋势呈现上升趋势; 经30日滑动平均处理后太阳辐射与滞后60日的地温相关性较好, 以此构建的地温预报模型能够较好地预报出地温的周期波动性, 并且预报准确率较高。

关键词: 80cm地温、太阳辐射、预报模型、滑动平均

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.007

Distribution Features of Earth Temperature at 80 cm in China and Prediction Method Based on the Factor of Solar Radiation

Ni Minli¹, Han Leqiong², Zhao Luqiang¹

(1 Public Meteorological Service Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 MLOG Group Inc, Beijing 100081)

Abstract: Temporal and spatial distribution of earth temperature in China was analyzed based on the daily mean earth temperature at 80cm for 2001-2010. Meanwhile, the correlation of earth temperature with solar radiation was analyzed; the earth temperature prediction model was constructed by taking solar radiation as the predictor. The results show that earth temperature presents similarly seasonal variation in various depths, and reaches a ridge in summer then dropped to trough in the next spring. The long-term evolution demonstrated a rising tendency. We found that the correlation of the 60-day lagged earth temperature to the solar radiation become better after a 30-day moving average on each of the two series. Then, we constructed a prediction model to forecast the periodic fluctuation of the earth temperature, and got a higher accuracy. Thus this model may be applied in the future.

Keyword: 80 cm earth temperature, solar radiation, prediction model, moving average

0 引言

构成地球气候系统运作的重要机制是陆—气相互作用。在陆—气相互作用中, 土壤温度和湿度对上层大气的变化有着重要的影响。同时, 土壤温度不仅与上层大气有着交互作用, 还影响着种子的萌发、根系的发育等土壤内的生物过程。近年来, 随着气候变暖现象的加剧, 研究者们多将重心放在研究我国气温和降水等要素的分布及其变化, 通过统计及构建物理

模型, 运用模式预测等多种方法提高了预报准确率。但对影响大气环流的地温研究却较少, 部分研究表明, 地温的变化受太阳辐射平衡及土壤热量平衡的共同影响, 在不同经纬度和不同季节以及土壤组成不同的地区有着明显的差别。

我国地温站点分布相对气温观测站来说相对较少, 部分地区近10年才开展地温观测, 且在2000年前, 大部分站点只观测了浅层(0~20cm)地温。1980年以前, 全国浅层地温站点不足1000个, 且多集中分布于东北、山西等煤产地。1980年后, 我国逐渐发展深层地温研究, 部分气象站点开始增加深层地温的观测。2000年后, 除了西藏、新疆等偏远地区, 全国各地都有了代表性的地温站点。

收稿日期: 2016年6月8日; 修回日期: 2016年11月11日
第一作者: 倪敏莉(1983—), Email: chilliren@136.com
通信作者: 赵鲁强(1965—), Email: zhaolq@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局公共气象服务中心业务服务专项基金(M2014020)

杜军等^[1]研究了近45年拉萨地区地温变化趋势,发现拉萨浅层(40cm)和深层(80cm)地温均呈极为显著的升高趋势,提出了通过邻近站线性回归方法、差值法或平均值法进行填补,使其趋势完整,从而更好地进行分析。陈成国等^[2]对1961—2010年德州市地面及各深层地温的变化趋势进行了研究,结果表明地面温度及各深层地温均有增温趋势,明显增温主要出现在冬季,而夏季多为降温。王忠伟等^[3]则通过均值法和线性倾向估计法分析了新疆输油管道沿线160cm地温与气温的变化关系,结果表现出输油管道沿线的160cm地温呈北低南高的态势,也得到了地温随年代际上升的趋势。李帅等^[4]分析了黑龙江省春季浅层地温、气温变化特征,并利用该省逐日气温、20cm地温资料建立春季浅层地温预报模型。陈鹏狮等^[5]利用辽宁省近50年的0和5cm地温及平均气温资料,分析了0cm地温和气温,地—气温差的季节、年际和年代际变化特征,并建立了春播期5cm地温预测模型。上述研究均为针对某省范围的地温研究。吕红玉等^[6]通过分析1981—2010年黑龙江佳木斯气象站40~320cm的月平均地温资料,研究了三江平原的地温变化规律期气候突变等特征,定量给出地温升幅为0.496~0.574℃;其中,夏季升幅最大,月平均地温呈波形变化,振幅随深度增加而减小。强玉柱等^[7]分析了天水市近50年浅层地温变化及对气候变化的影响特征,得出浅层各季节及年平均地温均显著升高,5和20cm平均地温对气候变暖更敏感的结论。高振荣等^[8]对河西走廊地区深层地温的研究表明:近31年来河西走廊地区80、160、320cm深层地温均呈显著的波动上升趋势,存在3年波动周期,随着深度的增加,气温与地温的相关性略有降低。阿布都克日木·阿巴司等^[9]对新疆喀什市的深层地温进行了研究,表明近30年来,喀什市各深层地温的年均值呈明显的阶段性特征,80和160cm深层地温年均值在1985和2009年发生了突变,3.2m深层地温年均值在1985和2008年发生了突变。高学芹等^[10]利用潍坊市1980—2014年80~320cm地温资料研究潍坊深层地温对气候变化的响应,结果表明随着深度的增加,气温与各层地温的相关性略有降低,这是深层地温变化存在滞后性所致,降水量对各深层地温影响不大。这些研究都说明了不同季节、不同地域深层地温对气候变化的响应程度是不同的。此外,赵红岩等^[11]研究了夏季西太平洋副热带高压位置与地温变化的关系,副热带高压脊线的位置与中国深层地温的关系非常明显,在100°—115°E、30°—45°N地区呈现高相关性。上述研

究都支持地温随年代际增暖,并且与气温及其他环流因子关系明显^[12-13]。

基于之前的研究多数集中于局部地区,没有对全国的地温分布进行过研究,本文试图通过对全国测站观测到的2001—2010年逐日80cm处的地温进行分析,得到其季节变化、年际变化及年代际变化的趋势。并根据其与太阳辐射的关系构建地温预报模型,从而预报逐日的地温。

1 资料与方法

1.1 资料选取

本文选取的资料来自于中国气象局国家气象信息中心提供的全国地温80cm层的站点资料及全国站点的太阳辐射资料。之所以选用80cm的地温资料,主要是因为2001—2010年有观测的地温站点中80cm地温比160cm的站点多82个,且该层地温站点不缺测天数在2920天(即8年)以上的站点也比160cm的更多。因此,80cm层的资料相对于160cm层的地温更全,受深层地热影响相对较少,同时又受地面气象要素的影响较多,气象因子对它的影响较大,更方便找到预报因子。

1.2 数据处理

本文选取2001年1月1日—2010年12月31日逐日地温数据,统计发现,全国80cm地温不缺测天数在2555天(即7年)以上的地温站点总共有729个,但部分站点并不是从2001年就开始观测或者观测没有持续到2010年。对站点数据的起始和结束年份进行统计后,剔除掉观测长度不足10年的站点,剩下112个站点的地温资料。在这剩下的站点资料中,仍然存在较为明显的缺测情况,因此,根据缺测情况的不同进行了填补:对于连续缺测在10天以内的,以前后10天的滑动平均来填补;连续缺测在10天至1个月以内的,以前10天和后10天未缺测值的斜率平均值做填补。

1.3 预报模型

一元回归模型主要用2001—2009年的地温值作为拟合时段,与预报因子计算相关系数,从而构建一元回归预报模型。

$$y=ax+b \quad (1)$$

式中, y 是地温预报值, a 是预报系数, b 是回归参数。用最后一年的预报因子 x 代入该公式中计算2010年的地温预报值,并对预报结果做评测。

2 地温分布特征

进行地温资料填补后,根据112个站点海拔高度(h)的不同将其分成7组。对于 $h \leq 100\text{m}$ 以下的站

点,在华北、江南、华南地区分别选取2个站点;对于 $100 < h \leq 500\text{m}$ 、 $500 < h \leq 1000\text{m}$ 、 $1000 < h \leq 1500\text{m}$ 及 $h > 1500\text{m}$ 的站点中分别选取2个站点,最终得到14个代表站点,详见表1。

表1 14个代表站点

Table 1 Information from 14 representative stations

站名	海拔高度/m	纬度/ $^{\circ}\text{N}$	经度/ $^{\circ}\text{E}$
赤峰	569	42.3	118.9
张家口	725	40.8	114.9
唐山	24	39.7	118.1
保定	18	38.8	115.5
那曲	4508	31.5	92.1
拉萨	3651	29.7	91.1
思茅	1302	22.8	101
蒙自	1305	23.4	103.4
平江	105	28.7	113.6
郴州	187	25.8	113.0
徐州	42	34.3	117.2
景德镇	62	29.3	117.2
广州	43	23.2	113.3
汕头	7	23.4	116.7

根据14个代表站点的地温随时间演变(图1,因篇幅限制仅展示其中6个站点)分析发现,尽管地理位置不同、海拔高度不同,但是地温变化表现出相同的波动性:年际变化呈现明显的振荡;季节变化则表现出夏季最高,在夏中到达波峰,随后开始下降,到冬末初春达到一年的最低值,随后开始上升;趋势线表现出地温的年代际变化趋势是增长的,不同的海拔高度,增长趋势不同。高海拔的地区增长趋势相对明显。

3 地温预报模型

太阳辐射是地气系统的主要热源,地球的热力平衡关系受太阳辐射的影响。近年来,一些研究^[14]指出太阳辐射是影响气象要素变化的重要因素,通过分析气温和太阳辐射的分布特征,指出太阳辐射和气温呈现之后一年的正相关;申彦波等^[15]在研究中也指出太阳辐射对地温有着显著的影响。在本研究中,对全国2000年1月1日—2009年12月31日的太阳辐射资料进行了整理,根据辐射资料完整性,结合地温资料的缺失情况,最终确定了56个站点(图2)的地温及辐射资料可用,文中构建地温预报模型的地温站也是基于该

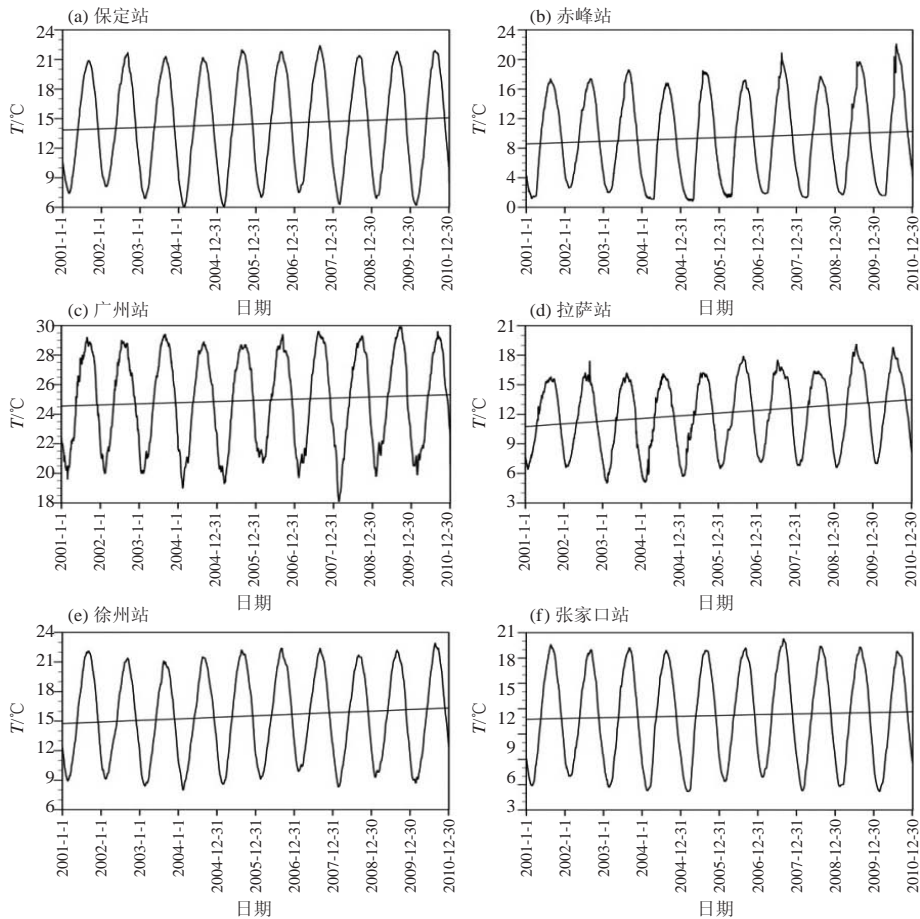


图1 2001—2010年6个站点的日平均地温变化趋势

Fig.1 Daily mean earth temperature variations from 2001 to 2010 at six stations

56个站点来完成。

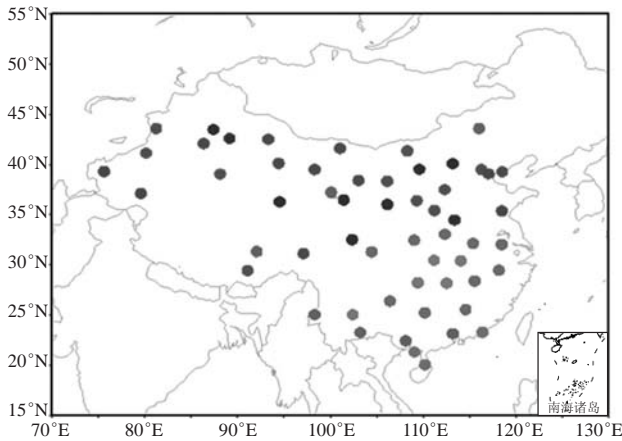


图2 56个站点分布图

Fig.2 Locations of the 56 stations

最终选定的56个地温站点，除了西藏、东北以及福建沿海外，全国大部都有分布，其中四川南部和云南北部分布较少，长江中下游及华中等地区分布较密集。除了地形地貌、人口及经济因素导致深层地温观测站点分布不均匀外，辐射站点分布较为稀疏也对站

点的最终选择有较大影响。对于东北地区，站点本身建站时间较短且缺测相对严重，同时由于气候原因，冬季气温偏低，对地下管道的铺设和维修等业务有较大影响，因此该处地温的预报在实际工作中使用较少。基于上述理由，最终没有挑选东北地区的站点。但随着后期地温和辐射站点的增加，在业务运行中，可以着重对东北、西藏等站点分布稀疏的地区进行地温预测研究，从而推动地温分布全国研究的进展。

对这56个地温站点同期的地温资料和辐射资料进行对比研究（图3，仅显示4个站点）发现，虽然辐射波动相比地温波动明显较多、日变化也较大，但是二者的年际变化表现出相似的特征。对单个站点的地温及其辐射资料（图4）进行对比，发现地温和辐射都有明显的1年波动周期。地温在每年的夏中达到波峰，而辐射则在春季出现波峰。

基于地温和辐射二者变化的关系，对辐射资料作30日滑动平均，并计算它与地温的相关系数（图5），发现辐射对滞后60日的地温影响最强烈，二者达到波峰波谷的时间几乎是完全对应的。基于此，对太阳辐射做30天滑动平均，并且取在时间上比地温提

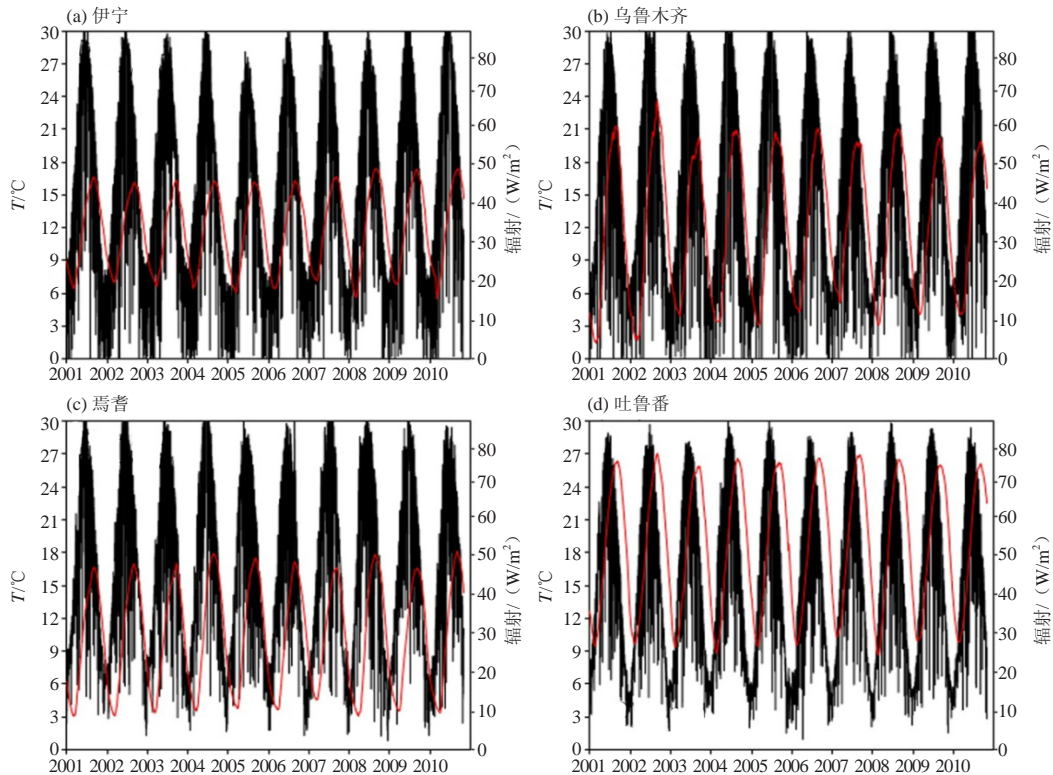


图3 4个站点逐日辐射和逐日地温变化趋势（红色实线表示逐日地温；黑色实线表示逐日辐射）

(a) 伊宁；(b) 乌鲁木齐；(c) 焉耆；(d) 吐鲁番

Fig.3 Variations of daily earth temperature and solar radiation during the period from 2001 to 2010 at four stations (Red solid lines denote daily earth temperature; Black solid lines denote daily solar radiation)

(a) Yining; (b) Urumqi; (c) Yanqi; (d) Turpan

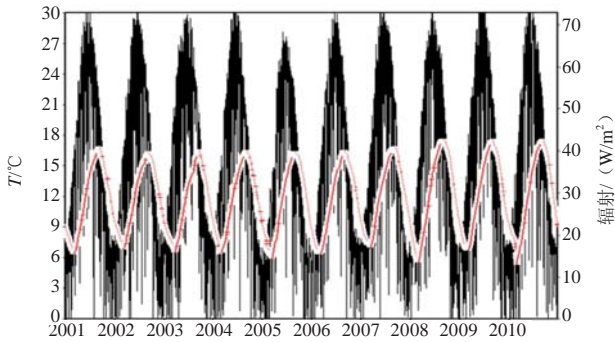


图4 伊宁站的逐日地温和逐日辐射变化趋势
(红色实线表示逐日地温; 黑色实线表示逐日辐射)

Fig.4 Variations of daily earth temperature and solar radiation in 2001–2010 at Yining (Red solid lines denote daily earth temperature; Black solid lines denote daily solar radiation)

前两月的辐射资料作为预报因子。

考虑到地温演变呈现波动性, 经过上述处理后, 辐射值和地温的波动周期相同但振幅不同。为此提出一个新的一元回归预报方法(图6): 将地温和辐射

值自身的趋势线作为分割, 分为A、B(上下)两个位相。以辐射的A位相作为地温A位相的预报因子, 以辐射B位相作为地温B位相的预报因子, 分别构建两个预报方程, 公式(1)是常规的一元回归方程, 公式(2)是计算一元回归方程截距的方程。公式(3)和(4)是本文构建的两个一元回归方程的截距, 通过两个截距分别构建了两个预报方程。此后, 对两个方程做条件判断: 当二者的值均小于(大于)地温趋势线时, 预报值y值取二者中相对较大(较小)的那个; 当一个大于趋势值, 一个小于趋势值时, y值等于二者的平均值。

$$b = \frac{\sum y}{n} - a \times \left(\frac{\sum x}{n} \right) \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{\sum y_A}{n} - a \times \left(\frac{\sum x_A}{n} \right) \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{\sum y_B}{n} - a \times \left(\frac{\sum x_B}{n} \right) \quad (4)$$

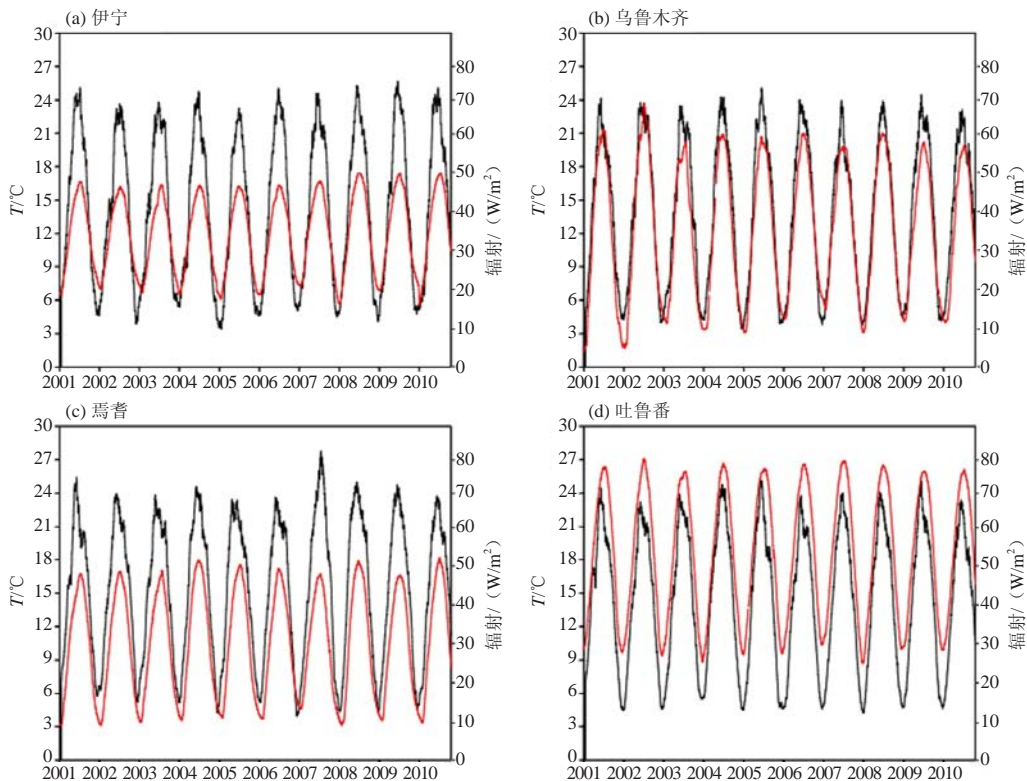


图5 30日滑动平均的逐日辐射以及滞后60日的逐日地温变化趋势(红色实线表示滞后60日的逐日地温, 黑色实线表示30日滑动平均的逐日辐射)

(a) 伊宁; (b) 乌鲁木齐; (c) 焉耆; (d) 吐鲁番

Fig.5 Variations of the 60-day lagged daily earth temperature and solar radiation in 30 days moving average for 2001–2010 at four stations (Red solid lines denote the 60-day lagged daily earth temperature; Black solid lines denote daily solar radiation in 30 days moving average)

(a) Yining; (b) Urumqi; (c) Yanqi; (d) Turpan

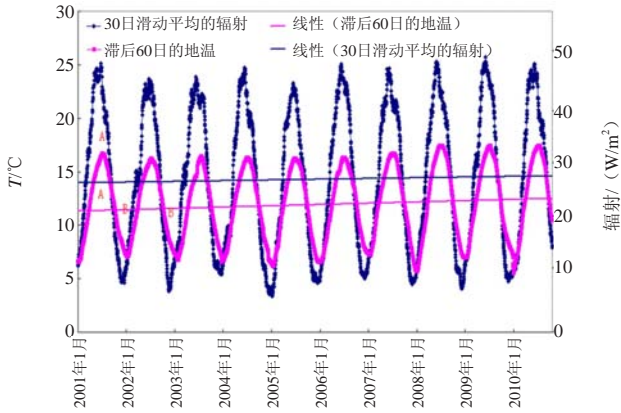


图6 滞后60日的逐日地温值和30日滑动平均的辐射值的线性趋势 (粉色实线代表逐日地温, 以其本身的粉色趋势线作为分割, 可分为A、B两部分; 蓝色实线代表逐日辐射, 以其本身的蓝色趋势线作为分割, 也可分为A、B两部分)

Fig.6 Linear trend of the 60-day lagged daily earth temperature and solar radiation in 30 days moving average for 2001–2010 (Pink solid lines denote daily earth temperature, divided into part A and part B; Blue solid lines denote daily solar radiation, divided into part A and part B)

以此公式预报的地温值和实况地温比较 (图7), 可以看到2001—2009年的拟合阶段拟合值 (黑色) 和实况值 (红色) 非常接近, 能很好拟合出波峰和波谷的位置, 并且二者相差较小。同时, 2010年地温的预报值 (黑色) 和实况值 (红色) 非常接近, 完整体现了地温的季节波动。构建的地温预报模型很好地预报了地温的变化情况。并且二者的变化呈现同步性, 预报的地温能较好地表现出实况地温的季节变化和年际增长。

利用2010年的资料, 给出该方程预报的地温和实况的相关系数 (图8), 可以看出二者的相关性较高, 56个站点均通过了0.01的显著性检验。绝大多数站点的相关系数在0.7以上, 56个站点的平均相关系数为0.87。有两个站点的预报相对较差有可能是因为当地的辐射缺测值较多造成的。另外, 对56个站点的预报和实况的均方根误差进行计算得到56个站点的平均的均方根误差为3.2。

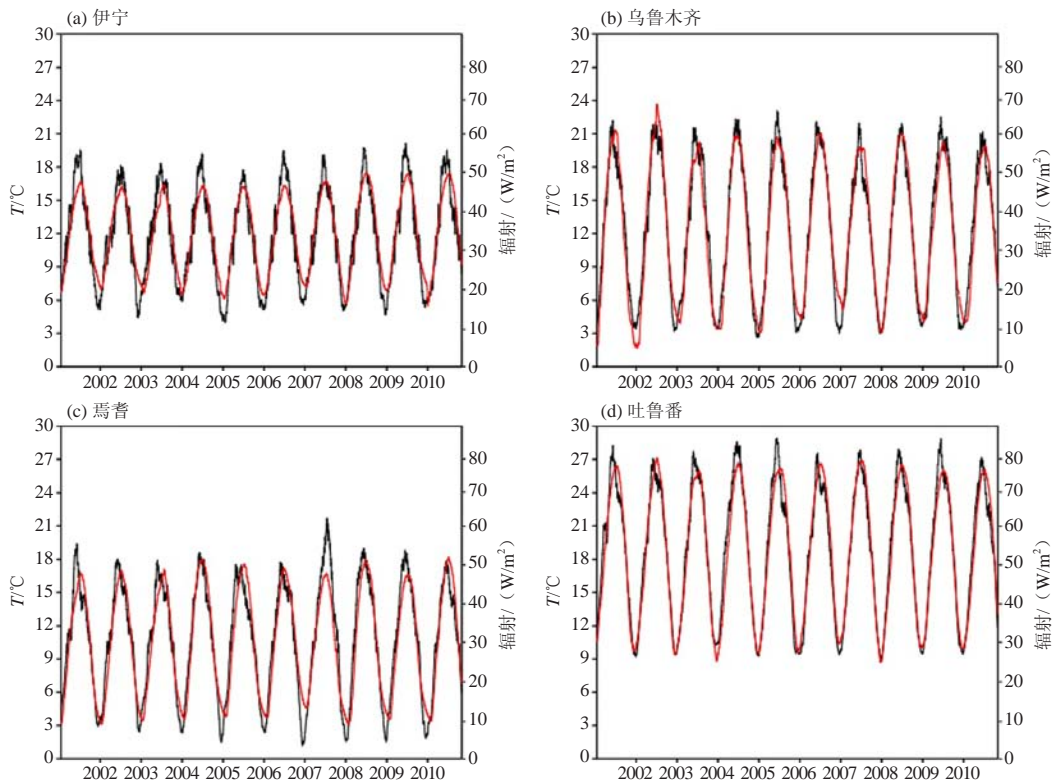


图7 4个站点日平均地温拟合及预报值与实况的对比 (红色实线表示地温实况值, 黑色实线在2001—2009年表示地温拟合值, 在2010年表示地温预报值)

(a) 伊宁; (b) 乌鲁木齐; (c) 焉耆; (d) 吐鲁番

Fig.7 Comparisons of fitting, forecast value and the observed value for daily earth temperature for 2001–2010 (Red solid lines denote observed value; Black solid lines denote fitting value in 2001–2009 and forecast value for 2010)

(a) Yining; (b) Urumqi; (c) Yanqi; (d) Turpan

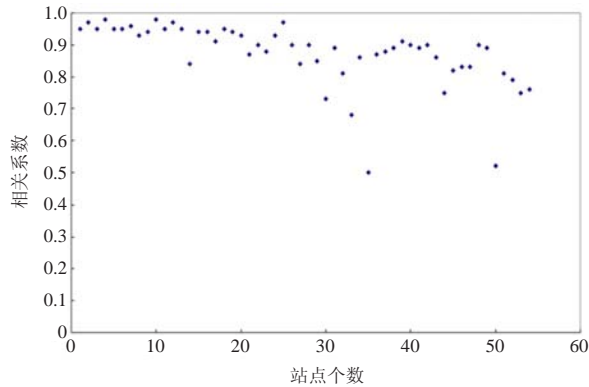


图8 56个站点的预报值和实况值的相关系数
Fig.8 The correlations between forecast values and observed values for various number of 56 stations

4 结论与讨论

1) 不同海拔高度的地温均呈现波动上升趋势, 并表现出一致的季节性波动, 夏季达到波峰, 初春降到波谷。

2) 太阳辐射的逐日波动虽然比地温明显很多, 但表现出相似的季节性波动, 春季辐射达到波峰, 冬季降到波谷。在对其做了30日滑动平均后, 其波形和滞后60日的地温波形有较高的一致性, 并表现出相似的年际变化。

3) 根据太阳辐射和滞后60日的地温较高的相关系数, 通过本文定义的新回归预报方程, 构建出地温预报方程。通过上述对该方程地温预报的评测结果可以看出, 该模型能较好地预报出地温的逐日变化和季节变化趋势。可用于后期的业务工作, 该预报方程能提前一个月给出下月的地温预报, 在地温业务预报中有较好的应用性。

4) 地温的预报可根据辐射值通过一定的预报方程得到, 但是辐射值的缺失会影响预报结果的准确性。因此在日常生活中, 辐射的观测非常重要, 辐射观测值越精确, 地温预报结果越好。

虽然由辐射构建的地温预报方程有较好的效果, 但是基于辐射数据的观测站点不全, 部分站点无法构建预报方程。目前国内已有基于卫星数据对历史辐射数据的反演, 可以考虑对该类反演数据进行评估, 再用来对地温进行预报。此外, 因为辐射数据受云量等影响较大, 也可以采用各台站每日4次的云观测数据来进行地温的预报。

地温的影响因素很多, 除了辐射因子, 地下水、土壤含水量与地温之间也有一定的联系, 地下水位对地温的影响存在临界值, 当地下水埋深超过临界值

时, 地下水就对地温不再具有影响作用^[16]。

浅层地温资料可以用作强震和旱涝形式分析。地壳运动将部分动能转化为热能, 地温升高, 随即出现旱象, 地壳运动进一步加剧而导致爆发式能量释放——地震, 久旱后遂大涝, 从而形成热—旱—震—涝的模式。由于热与震、旱涝相关性的不确定, 仅能从几年热态变化趋势给出未来2~5年震、旱、涝的基本形势估计^[17]。

另外, 研究地温的逐日变化和月、季、年长度的预测, 对地下管道架设, 深层煤矿、油气分布研究及温泉探测等方面有重要的指导意义。其历史的变化特征及对逐日地温的预测, 在地下管道选址、施工及管道维护等方面有较重要的作用。后期在地温预测开展为业务化后, 可为各大燃气公司提供相应的咨询和预警。另外, 随着深层地温的观测站点逐渐增加, 可对局部地热异常场展开类似的地温研究, 并给出局地地热异常的预测及预警, 从而指导热田等的勘探开发工作, 该部分工作需要在地热异常进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 杜军, 李春, 廖健, 等. 拉萨近45年浅层地温的变化特征. 干旱区地理, 2007, 30(6): 826-831.
- [2] 陈成国, 石慧兰, 王桂兰, 等. 1961—2010年德州市地温变化特征. 气象与环境学报, 2012, 28(1): 86-89.
- [3] 王忠伟, 张新军, 杨静. 新疆输油气管道160cm地温气候特征分析. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(2): 39-42.
- [4] 李帅, 王萍, 陈莉, 等. 黑龙江省春季浅层(0~20cm)地温变化特征及预报. 冰川冻土, 2014, 36(1): 55-62.
- [5] 陈鹏狮, 张玉书, 冯锐, 等. 50年来辽宁省地温变化规律及播种期地温预报研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 163-167.
- [6] 吕红玉, 张林媛, 张宏茹, 等. 1981—2010年三江平原40~320cm深地温变化特征. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1347-1352.
- [7] 强玉柱, 蒲金涌, 刘扬, 等. 天水市近50年浅层地温变化特征分析. 中国农学通报, 2013, 29(35): 317-322.
- [8] 高振荣, 李红英, 曹淑超, 等. 近31a河西走廊地区深层地温变化及突变分析. 干旱区地理, 2013, 36(6): 1006-1011.
- [9] 阿布都克日木·阿巴司, 麦合布热提·买买提依明, 努尔帕提曼·买买提热依木, 等. 新疆喀什市深层地温的变化特征分析. 中国农业气象, 2014, 35(3): 237-242.
- [10] 高学芹, 袁静. 1980—2014年潍坊市深层地温对气候变化的响应. 中国农学通报, 2015, 31(28): 201-206.
- [11] 赵红岩, 杨瑜峰, 张久林, 等. 夏季西太平洋副高位置与中国地温场的关系. 高原气象, 2007, 26(5): 1119-1122.
- [12] 彭楚明, 何有海, 关翠华, 等. 南海夏季风爆发与海温和大气对流的低频变化. 高原气象, 1999, 18(4): 603-612.
- [13] 赵勇, 何冬燕, 秦贺. 乌鲁木齐地温特征及其与降水的关系. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(2): 13-17.
- [14] 季国良, 吕兰芝. 格尔木太阳辐射与气温的多年变化. 高原气象, 1997, 16(1): 30-35.
- [15] 申彦波, 王标. 近50年中国东南地区地面太阳辐射变化对气温变化的影响. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1457-1465.
- [16] 傅志敏, 周志芳, 李明武. 基于地下水埋深效益的地温突变判据. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 441-445.
- [17] 张治兆. 浅层地温变化与强震、旱涝的关系. 中国减灾, 1992, 2(8): 38-39.