

杨丽萍,李丹,秦艳,等. 锡林郭勒草原生长季地—气温度变化特征及其相关性[J]. 干旱气象, 2016, 34(4): 617–622. [YANG Liping, LI Dan, QIN Yan, et al. Variation Characteristics of Air Temperature and Ground Temperature and Their Correlation in Xilinguole Grassland During Growing Season from 1960 to 2014[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(4): 617–622], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0617

## 锡林郭勒草原生长季地—气温度 变化特征及其相关性

杨丽萍<sup>1</sup>, 李丹<sup>1</sup>, 秦艳<sup>2</sup>, 张存厚<sup>1</sup>,  
Oxana Vishnyakova<sup>3</sup>, 吕迪波<sup>1</sup>

(1. 内蒙古生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 中国农业科学院草原研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 俄罗斯科学院西伯利亚分院普通与实验生物学研究所, 俄罗斯 乌兰乌德 670047)

**摘要:**利用锡林郭勒草原8个气象站1960—2014年5—9月气温和0~40 cm地温逐旬观测资料,采用线性倾向估计、5 a滑动平均、线性回归等统计方法,分析锡林郭勒草原生长季地—气温度的变化特征及相关关系。结果表明:近55 a来,锡林郭勒草原生长季地—气温度都呈显著上升趋势,“前冷后暖”特点十分明显,且0~20 cm地温的增幅远高于气温,40 cm地温增幅则低于气温。生长季地—气温度月变化呈“低—高—低”抛物线形状,最高值出现在7月。5—8月地温随土层深度增加而下降,而9月地温随深度变化不明显。各层地温与气温呈显著正相关,且随深度增加相关性逐渐减小;地—气温度线性关系模型在各层拟合效果较好,用于预测和估算各层地温,基本可以满足该地区牧业生产实践的需要。

**关键词:**锡林郭勒草原;地温;气温;相关关系

**文章编号:**1006-7639(2016)-04-0617-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0617

**中图分类号:**P423

**文献标识码:**A

### 引言

全球气候变暖已经是不争的事实,草原生态系统的退化目前也成为备受关注的全球性生态环境问题,尤其是在干旱、半干旱区,草原生态系统对气候变化具有极强的敏感性。我国草原区气候暖干化的趋势非常明显<sup>[1]</sup>,且北方最为显著<sup>[2]</sup>。地温是表征气候变化的主要气象要素之一,下垫面温度和不同深度的土壤温度统称地温<sup>[3]</sup>。地温是影响植物生长的重要气象因子,对植物运输水分、吸收养分和土壤中有效养分的变化等有重要影响<sup>[4]</sup>,从而影响种子的萌发、幼苗和根系的生长发育。地温的农业气象学意义极其重要<sup>[5]</sup>,在农作物、牧草返青过程中,其贡献率甚至大于其它气象因子<sup>[6]</sup>。近年来,许多

学者对地温变化规律开展研究<sup>[7-12]</sup>,然而,相对于气温,地温资料的获取较气温更为复杂和烦琐。因此,利用实测或中长期天气预报的气温来估算地温,对于调整畜牧业结构、合理安排生产时间、预测牧草生长发育和科学防灾减灾等牧业生产实践活动具有重要现实意义。

锡林郭勒草原位于内蒙古自治区中部,是欧亚大陆草原的重要组成部分,也是我国温带典型干草原气候区,华北地区的重要生态屏障。锡林郭勒草原与内蒙古气温变化一致,具有明显变暖趋势<sup>[13]</sup>。以往锡林郭勒草原气候变化研究主要集中在气温、降水等方面,而对不同土层深度地温长时间序列变化及其与气温的关系研究较少。因此,本文针对锡林郭勒草原生长季(5—9月)地—气温度变化特征

收稿日期:2016-01-27;改回日期:2016-05-30

基金项目:内蒙古自然科学基金(2014MS0352)、国家自然科学基金(31200540)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2014CB1388011)、中国农业科学院创新工程(CAAS-ASTIP-IGR2015-04)、国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD13B07)和国家牧草产业技术体系项目(CARS-35-29)共同资助

作者简介:杨丽萍,女,博士,高级工程师,主要从事生态气象、遥感等领域研究. E-mail: ylp725121@126.com

通信作者:秦艳,女,博士,高级工程师,主要从事草类种子与种质资源研究. E-mail: qinyan\_80@163.com

及相关关系开展研究,为做好该区牧业气象服务提供一定的理论基础,有助于揭示土壤温度对畜牧业生产和生态环境的影响,对恢复草原生态和畜牧业生产布局具有一定的指导意义。

## 1 资料与方法

所用资料为内蒙古自治区气象局提供的1960—2014年5—9月(牧草生长季)锡林郭勒盟东乌旗、二连浩特、阿巴嘎旗、苏左旗、朱日和、西乌旗、锡林浩特、多伦县8个气象观测站的旬平均气温和0、5、10、15、20、40 cm旬平均地温观测资料。其中,部分气象站的个别缺测数据用多年平均值代替。

采用线性倾向估计方法、5 a 滑动平均法<sup>[14]</sup>分析气候变化趋势,利用线性回归法进行地—气温度相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 地—气温度变化特征

#### 2.1.1 年际变化

在全球气候变暖背景下,1960—2014年锡林郭勒草原牧草生长季不同土层深度平均地温与气温总体呈波动上升趋势,且变化规律基本一致,“前冷后暖”特点十分明显(图1),与全国、锡林郭勒盟及多伦县气温变化趋势一致<sup>[15-18]</sup>。近55 a来,生长季气温倾向率为 $0.353\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ,0~40 cm地温倾向率分别为 $0.445$ 、 $0.448$ 、 $0.446$ 、 $0.393$ 、 $0.408$ 、 $0.321\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ,可见0~20 cm地温增幅远高于气温的增幅。整个时段内地—气温度大致可分为3个阶段:1960—1992年温度变化不大,持续在较低水平上波动,为相对冷期;1993—2001年温度急剧升高;2002—2014年温度变化不大,持续在较高水平上波动,是历年来温度最高时期,2007年温度出现最高峰值,此阶段为相对暖期。

#### 2.1.2 月变化

近55 a来,锡林郭勒草原生长季不同土层深度地温月变化曲线均呈“低—高一低”抛物线形状,与气温变化趋势相一致。其中5—7月温度呈上升趋势,最高值均出现在7月,之后开始下降,9月降为最低值(图2)。0~20 cm各层地温基本都高于气温,地—气温差多为正值,仅5月20 cm地温低于气温,地—气温差为负值;40 cm地温5—7月低于气温,地—气温差为负值。5—8月,地—气温差随土层深度增加呈降低趋势;9月地—气温差随土层深度变化相对不大,且从5 cm开始随土层深度增加温差逐渐增大(表1)。

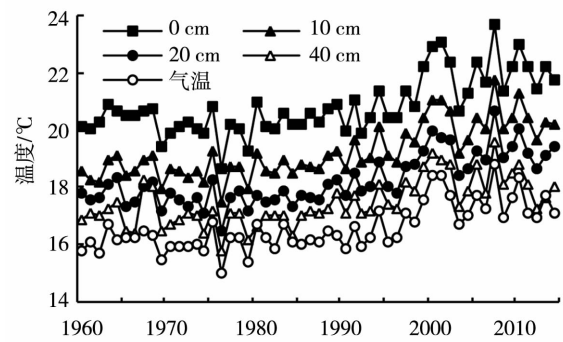


图1 1960—2014年锡林郭勒草原牧草生长季不同土层深度平均地温与气温的年际变化

Fig. 1 The annual variations of mean air temperature and ground temperature in different soil depths in Xilinguole grassland from May to September during 1960 - 2014

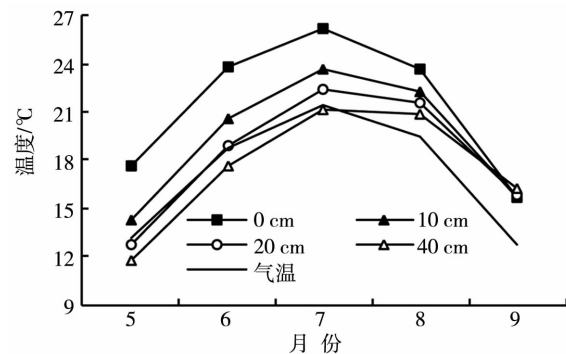


图2 1960—2014年5—9月锡林郭勒草原不同土层深度平均地温与气温的月变化

Fig. 2 The monthly variations of mean air temperature and ground temperature in different soil depths in Xilinguole grassland from May to September during 1960 - 2014

表1 1960—2014年5—9月锡林郭勒草原不同土层深度地—气温差(单位:°C)

Tab. 1 Difference between air temperature and ground temperature in different soil depths in Xilinguole grassland from May to September during 1960 - 2014

土层深度/cm	5月	6月	7月	8月	9月
0	4.4	5.0	4.6	4.1	3.0
5	2.2	2.8	2.9	3.0	2.7
10	1.2	1.8	2.2	2.7	3.0
15	0.3	0.9	1.5	2.3	3.1
20	-0.4	0.2	0.9	2.0	3.2
40	-1.4	-1.2	-0.3	1.3	3.6

#### 2.1.3 地温垂直变化

由于土层热量衰减性质,不同土层之间存在着一定的热量传递。1960—2014年,锡林郭勒草原8

个台站及5—8月平均地温,基本都表现为随土层深度增加而下降的垂直变化规律,而9月平均地温不同深度变化不大(图3)。8个台站地温随土层深度下降幅度较为剧烈,并表现出很好的一致性。其中,位于锡林郭勒草原东南端的多伦县下降幅度最大,到40 cm处下降了5.2℃,其次是东乌旗,下降了5.1℃,苏左旗下降幅度最小为2.9℃(图3a)。土层温度的剧变有利于土壤微生物的活动,且能降低土壤表层的水分蒸发,增加降水的有效性。

除9月外,其余月份地温垂直变化曲线表现出

越远离地表地温变化幅度越小的特征(图3b)。5—7月各层地温垂直方向上的梯度基本相同,受太阳辐射影响,地表温度逐渐升高,且高于其它各土层的地温,热量由上至下传递;8月地温梯度较前期有所减缓,土壤接受到的太阳辐射逐渐减弱,各层地温都有所降低,且地表温度仍高于其它各土层的温度,热量依然向下传递,但上层地温的传递速率高于下层地温的传递速率;9月地温垂直梯度方向发生改变,各层地温相差不大,5 cm以下土层热量开始由下向上传递。与张翠华等<sup>[19]</sup>研究结果相同。

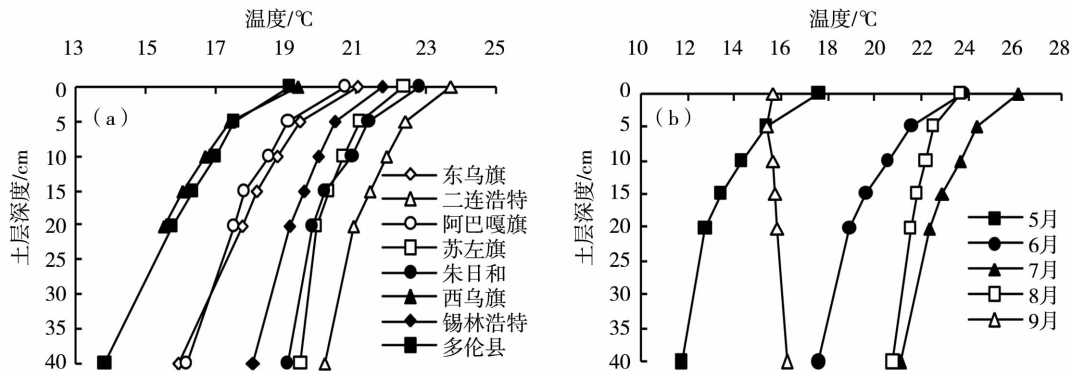


图3 1960—2014年生长季锡林郭勒草原各站(a)和各月(b)地温的垂直变化

Fig.3 The vertical changes of ground temperature in 8 stations (a) and each month (b) in Xilinguole grassland from May to September during 1961-2014

## 2.2 地—气温度的相关关系

### 2.2.1 构建模型

为进一步探讨锡林郭勒草原生长季地温与气温的关系,不考虑其它影响因子,利用1960—2014年不同土层深度(0、5、10、15、20、40 cm)5—9月各旬平均地温与气温时间序列进行相关性分析,发现各层地温与气温均呈显著线性正相关关系,均通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验(表2)。其中0~10 cm地温与气温相关系数均 $> 0.9$ ,随土层深度增加相关系数多呈逐渐减小趋势,这与曹兴等<sup>[20]</sup>研究结果一致;40 cm地温与气温相关性最差,相关系数最小是9月中旬,为0.605。

以相关系数最高的0 cm和最低的40 cm 5月各旬平均地温与气温为例,选取1960—2000年时间序列建立线性关系模型(图4),其线性关系式如下:

$$\begin{cases} y_{5上-0} = 0.9993x + 4.012 \\ y_{5中-0} = 1.0476x + 3.9275 \\ y_{5下-0} = 1.051x + 3.9504 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} y_{5上-40} = 0.5271x + 3.5949 \\ y_{5中-40} = 0.5416x + 4.4634 \\ y_{5下-40} = 0.3146x + 9.0673 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $y$ 表示旬平均地温; $x$ 为旬平均气温。

### 2.2.2 模型检验

利用2001—2014年数据对上述地—气温度线性关系模型进行检验,通过校准检验时段的模拟值与实测值对比发现,上述模型对5月0 cm、40 cm地温的拟合效果较好,模拟值与实测值具有较好的同步性(图5),除5月下旬40 cm地温外,其余均通过 $\alpha = 0.01$  ( $F_{0.01} = 9.330$ )的显著性检验, $F$ 检验值依次为: $F_{5上-0}(257.2) > F_{5中-0}(89.603) > F_{5下-0}(47.006) > F_{5上-40}(13.822) > F_{5中-40}(9.971) > F_{5下-40}(2.145)$ 。另外发现,5月0 cm地温模拟值与实测值非常接近,两者平均绝对误差(MAE)较小,最大为1.28℃,仅为实测值的6.0%(即平均相对误差);5月40 cm地温模拟值与实测值个别年份相差较大,其MAE普遍高于0 cm地温,最大为2.20℃,为实测值的13.5%。可见,上述地—气温度关系模型的预测效果较好,且0 cm较40 cm地温拟合度更高,用地—气温度关系模型来预测和估算各层地温,基本可以满足牧业生产实践需要。

表 2 1960—2014 年锡林郭勒草原生长季各旬不同土层深度地温与气温的相关系数  
 Tab. 2 The ten-day correlation coefficients between ground temperature and air temperature in different soil depths in Xilinguole grassland during the growing season from 1960 to 2014

		0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	40 cm
5 月	上旬	0.959	0.951	0.941	0.912	0.874	0.720
	中旬	0.951	0.927	0.906	0.877	0.848	0.735
	下旬	0.950	0.932	0.909	0.870	0.812	0.608
6 月	上旬	0.968	0.967	0.952	0.924	0.888	0.790
	中旬	0.944	0.949	0.923	0.888	0.849	0.705
	下旬	0.945	0.941	0.927	0.912	0.881	0.752
7 月	上旬	0.922	0.933	0.924	0.911	0.886	0.830
	中旬	0.964	0.960	0.950	0.949	0.915	0.835
	下旬	0.964	0.964	0.959	0.944	0.917	0.845
8 月	上旬	0.935	0.934	0.923	0.906	0.880	0.684
	中旬	0.950	0.949	0.950	0.942	0.941	0.868
	下旬	0.962	0.957	0.953	0.947	0.935	0.853
9 月	上旬	0.952	0.945	0.927	0.910	0.892	0.796
	中旬	0.966	0.935	0.901	0.860	0.826	0.605
	下旬	0.972	0.963	0.953	0.941	0.929	0.825

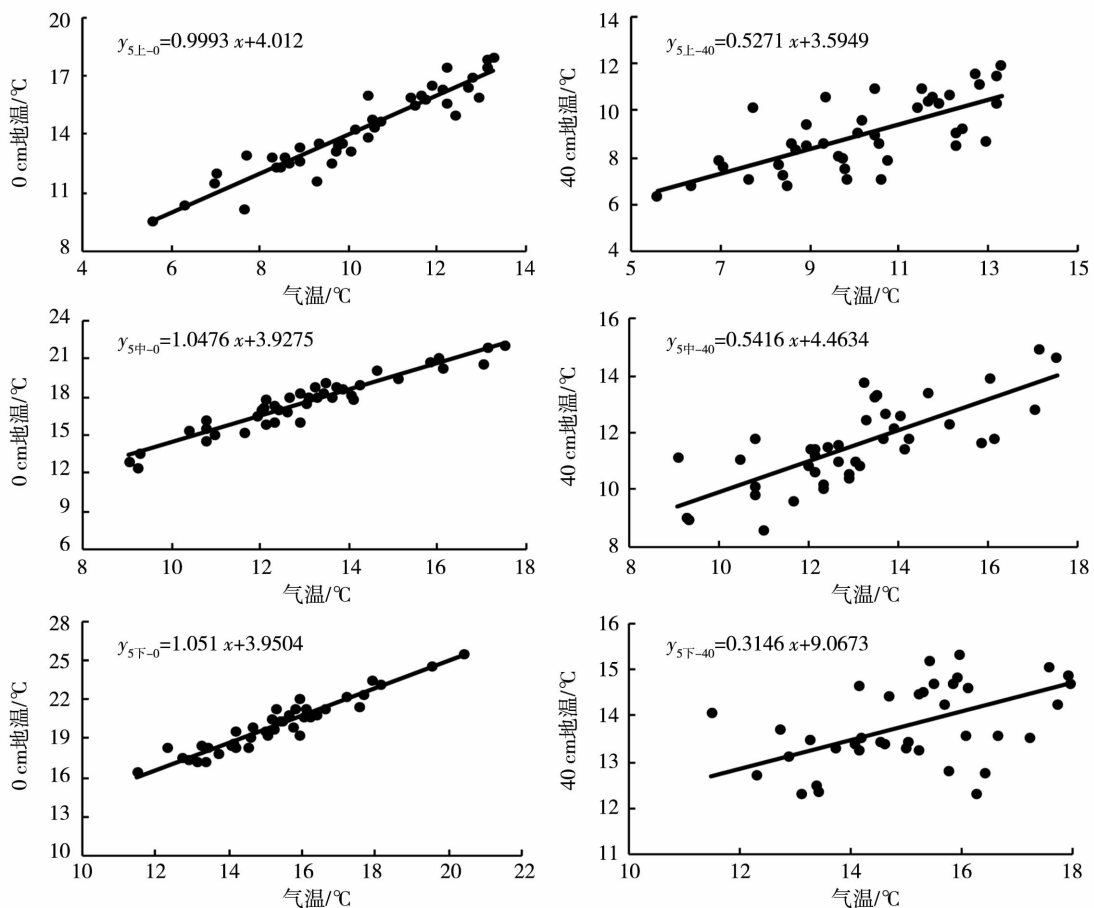


图 4 1960—2000 年 5 月各旬锡林郭勒草原 0 cm 和 40 cm 地温与气温的关系  
 Fig. 4 The relation between air temperature and ground temperature at 0 cm and 40 cm depths in Xilinguole grassland in every 10-day of May during 1960 - 2000

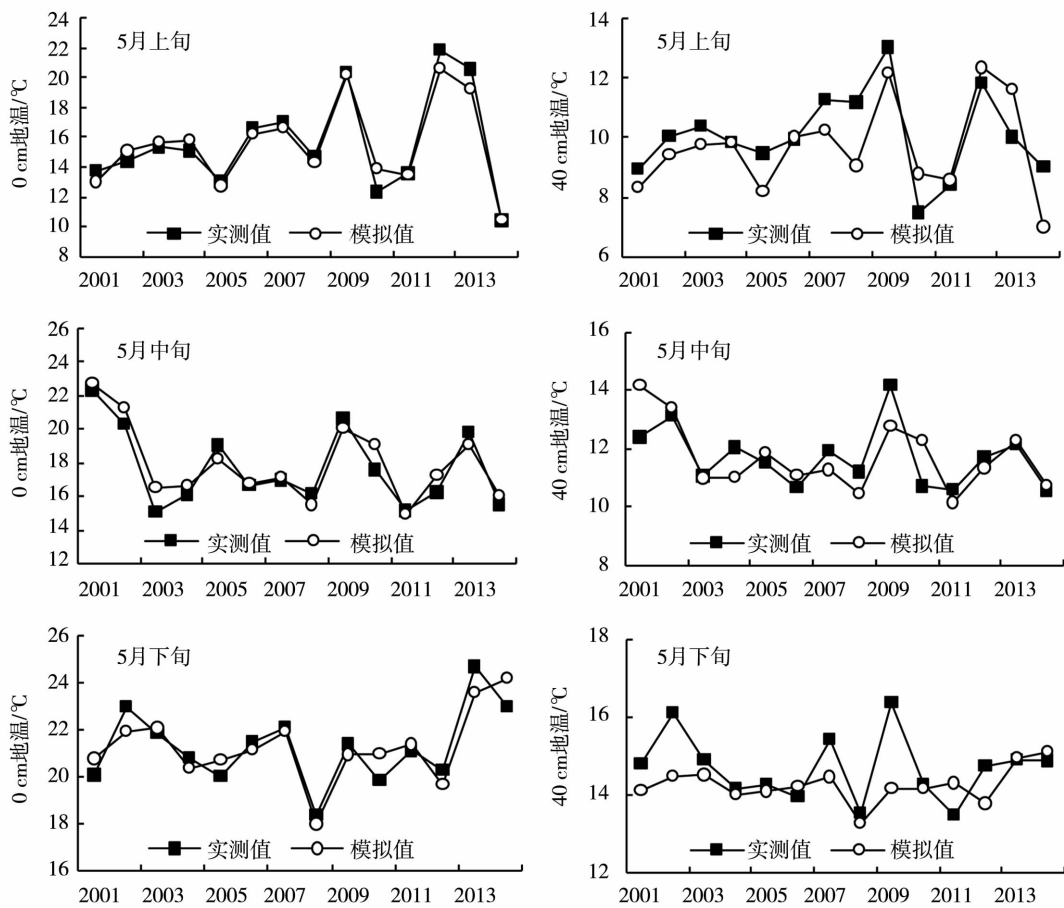


图5 2001—2014年5月各旬锡林郭勒草原0 cm、40 cm地温模拟值与实测值

Fig.5 The simulated and observed ten-day ground temperature at 0 cm and 40 cm depths in Xilinguole grassland in May during 2001 - 2014

### 3 结论与讨论

(1)近55 a来,锡林郭勒草原生长季平均地—气温度都呈波动上升趋势,“前冷后暖”的特征十分明显,0~20 cm地温增幅远高于气温的增幅,40 cm地温增幅则低于气温。生长季不同土层深度地温与气温的月变化趋势一致,呈“低—高一低”抛物线形状,最高值出现在7月。

(2)整个生长季8个台站地温都表现出随土层深度增加而下降的垂直变化规律,表明不同土层之间存在着一定的热传递;5—8月平均地温随土层深度增加而降低,9月平均地温随土层深度增加略有升高趋势,表明受太阳辐射影响,生长季不同时期各土层热量传递速率及方向会随之改变。

(3)生长季各层地温与气温均呈显著线性正相关关系,且随深度增加相关性逐渐减弱;地—气温度线性关系模型对各层地温的拟合效果较好,且有较好的同步性。除5月下旬40 cm地温外,模拟值与实测值平均误差较小,用该关系模型预测和估算各

层地温基本可以满足牧业生产实践需要。

气候变暖引起热量条件有所改善,对草原生态系统有一定的影响。一方面,有利于牧草返青期提前,黄枯期推后,草场利用时间延长;另一方面,地温持续升高,冻土层变浅,这为越冬病菌、虫卵等提供了有利的气候环境,致使病虫害更加频繁发生,从而加剧草地植被破坏,影响到牧业生产。因此,对气候变暖、地温持续升高应做好预测预报,提高风险防范意识,做到趋利避害。本文在分析锡林郭勒草原生长季地—气温度变化特征及相关关系时,仅利用单一气温资料来估算地温,计算方法简便、资料易于获取。但在遇特殊天气条件(如大风、降雨降雪等因素),地温与气温的关系有可能出现种种复杂情况,有待今后进一步研究。

#### 参考文献

[1] 白美兰,郝润全,邸瑞琦,等. 内蒙古东部近54年气候变化对生态环境演变的影响[J]. 气象,2006,32(6):31-36.  
 [2] 胡琦. 内蒙古地区多时间尺度气候变化及草地叶面积动态响应

- 研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [3] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 85.
- [4] 朱廷耀. 农田防护林生态工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [5] 李有, 董中强, 郑敬刚. 地-气温差的模拟与地温估算研究[J]. 中国农业气象, 2002, 23(3): 1-4.
- [6] 李正风, 张晓梅, 刘勇. 不同覆盖方式对植烟土壤温度和水分及烤烟品质的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(11): 224-227.
- [7] 梁媛, 刘滨辉. 大兴安岭北部地区夏季浅层地温的变化[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 83-84, 88.
- [8] 杜军, 胡军, 罗布次仁, 等. 西藏浅层地温对气候变暖的响应[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 745-751.
- [9] 顾欣, 张艳梅, 黄大卫. 近 50 年来黔东南地区浅层地气温差的时空分布特征分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1): 71-77.
- [10] 张焕平, 张占峰, 汪青春, 等. 近 40 年青海浅层地温的变化特征[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 146-152.
- [11] 贾效禄, 杨青, 赵勇, 等. 近 50 a 乌鲁木齐市的深层地温特征[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 201-204.
- [12] 朱宝文, 胡德奎, 郭晓宁, 等. 高寒地区日光温室地温变化及预报[J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 765-772.
- [13] 梁阿如娜, 张美杰, 刘月, 等. 近 50 年典型草原的气候变化[J]. 内蒙古林业科技, 2010, 36(4): 67-70.
- [14] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第 2 版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007. 37-42.
- [15] 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮. 中国近 80 年来气候变化特征及形成机制[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 634-646.
- [16] 包姝芬, 马志宪, 崔学明. 近 50 年锡林郭勒盟的气候变化特征分析[J]. 内蒙古农业大学学报, 2011, 32(3): 157-160.
- [17] 杨丽萍, 王林和, 秦艳, 等. 锡林郭勒草原东南部近 60 年的气温变化特征[J]. 中国草地学报, 2013, 35(4): 96-101.
- [18] 杨丽萍, 王林和, 秦艳, 等. 多伦县近 60 年气候变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 52-55.
- [19] 张翠华, 张方煜, 郭立平. 河北石家庄浅层地温变化特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 78-81.
- [20] 曹兴, 陈荣毅, 杨举芳, 等. 沙漠腹地秋季地温变化特征及其与气温的关系[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 433-438.

## Variation Characteristics of Air Temperature and Ground Temperature and Their Correlation in Xilinguole Grassland During Growing Season from 1960 to 2014

YANG Liping<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, QIN Yan<sup>2</sup>, ZHANG Cunhou<sup>1</sup>,

Oxana Vishnyakova<sup>3</sup>, LV Dibo<sup>1</sup>

(1. Ecology and Agricultural Meteorological Centre, Inner Mongolia Meteorological Bureau, Hohhot 010051, China;

2. Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Hohhot 010010, China;

3. Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude 670047, Russia)

**Abstract:** Based on the 10-day air temperature and ground temperature at 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 40 cm depths of 8 weather stations in Xilinguole grassland from May to September during 1960-2014, the variation characteristics of air temperature and ground temperature and their correlation during growing season were analyzed by using the statistic methods of linear tendency estimation, 5-year moving mean, linear regression. The results show that the air temperature and ground temperatures in different depths during growing season all presented significant rising trend in Xilinguole grassland in recent 55 years, the characteristic with 'previous cooling and later warming' was very obvious, and the rising rates of ground temperature at 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm depths were much higher than that of air temperature, while for ground temperature at 40 cm depth it was lower than that of air temperature. The monthly changes of air temperature and ground temperature during growing season showed parabola shape with 'low-high-low', the peak was in July. The ground temperature decreased with increase of soil depth from May to August, while it didn't change almost in September. There was significantly positive correlation between ground temperature in different depths and air temperature, and the correlation decreased with increase of soil depth. The fitting effect of the linear regression model between air temperature and ground temperature in each layer was better, and the model could be used to predict and estimate ground temperature in different depths, the predicting result could basically meet the needs of stockbreeding production in Xilinguole grassland.

**Key words:** Xilinguole grassland; ground temperature; air temperature; correlation