

中国年均地温的估算方法研究*

韩春兰 余无忌 刘金宝 付小梅 赵丽婷

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘 要 年均地温是土壤重要的物理性质, 对区域农业生产有着重要意义。对中国1981—2010年间895个气象站的地面气候资料进行整理, 按全国一级标准耕作制度分区分析。结果表明: 各区5~40 cm内各深度年均地温均高于相应气象站点的年均气温。同一分区内, 各气象站点5~40 cm年均地温随深度增加未表现出相同的变化规律; 不同深度的年均地气温差平均值在5~20 cm深度范围内变化 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$, 在20~40 cm深度范围变化较大, 个别分区达 0.4°C 。各分区之间比较, 5~40 cm年均地气温差平均值存在地域差异性: 自北向南, 年均地气温差平均值表现为先减小后增加的变化规律; 自东向西, 纬度接近的分区年均地气温差平均值逐渐增大; 不同分区年均地气温差平均值的变化较大, 20 cm深度为 $1.4\sim 3.9^{\circ}\text{C}$, 40 cm深度为 $1.1\sim 4.3^{\circ}\text{C}$ 。利用回归方程法和年均地气温差平均值法, 在各标准耕作制度一级区分别建立年均地温估算公式, 回归方程法的准确性高于年均地气温差平均值法, 但青藏高原区和内蒙古高原及长城沿线区的估算公式未达到很好的估算效果。对各分区5、10、15、20和40 cm年均地温观测数据完整的262个气象站的数据进行分析表明, 5~40 cm深度范围内, 多数分区年均地温每5 cm变化量的均值 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$, 20~40 cm深度的变化量更小。对于单一估算点, 其40 cm和50 cm年均地温的最大差距 $\leq 0.4^{\circ}\text{C}$, 所以, 在中国土壤系统分类中, 可以考虑用40 cm的地温代替50 cm的地温。

关键词 年均地温; 土壤温度; 预测模型; 区域分异

中图分类号 151 **文献标识码** A

地温在土壤中的分布和变化, 对土壤中各种物理、化学及生物反应的速率, 植物的生长发育及土壤的形成, 均有重要影响^[1-2]。虽然中国大部分气象站对年均地温进行了观测, 但现阶段气象站的数量有限, 并存在年均地温数据缺失的现象。在距气象站较远或没有气象站的地区进行土壤系统分类时, 很难即时获取单个土体的年均地温数据。进行大区域的地温测量, 需要大量的人力物力^[3], 不易实现。因此, 有必要对全国气象站的数据进行统计分析, 建立数学模型, 为中国土壤系统分类年均地温的获取确定估算方法。

国内外对地温的估算研究可概括为三个方面:

第一, 根据地温与深度的变化关系进行计算。史学正和邓西海^[4]利用1951—1980年间中国672个气象站40 cm和80 cm年均地温数据, 通过内插法计算了50 cm年均地温; 陈健飞^[5]分析了福建省4个气象站0~320 cm年均地温的观测数据, 发现20 cm以下年均地温随深度增加基本不变, 考虑以20 cm年均地温代替50 cm年均地温来确定土壤温度等级。第二, 根据地温与气象和环境因子的相关性建立经验模型进行估算。冯学民^[6]和张之一等^[7]分别根据全国150个气象站和黑龙江70个气象站的观测数据, 建立了年均地温与气温、年均地温与纬度和海拔的经验模型; 杨学明等^[8]利用全国114个气象站

* 国家自然科学基金项目(41171172)、国家科技基础性工作专项(2008FY110600, 2014FY110200A06)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41171172) and the National Science and Technology Basic Work (Nos. 2008FY110600, 2014FY110200A06)

作者简介: 韩春兰(1965—), 女, 内蒙古赤峰市人, 副教授, 主要从事土壤地理、土地资源管理等方面的教学和科研工作。E-mail: hancly@163.com

收稿日期: 2016-06-23; 收到修改稿日期: 2016-11-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-12-23

的地面气候资料，根据中国不同地区的气候类型，分区建立年均地温与年均气温、风速、降水量、经纬度和海拔的回归模型；Evrendilek等^[9]根据土耳其2000—2005年间的气候数据，以海拔、经度、纬度为辅助变量，建立了月最高、最低气温与地表下5 cm深度月均地温的数学模型。第三，利用GIS技术建立地温的预测模型。张慧智等^[10]以中国698个气象站1971—2000年间的地面气候资料，通过三种不同的克里格法分别预测了0、20及40年均地温的空间分布。

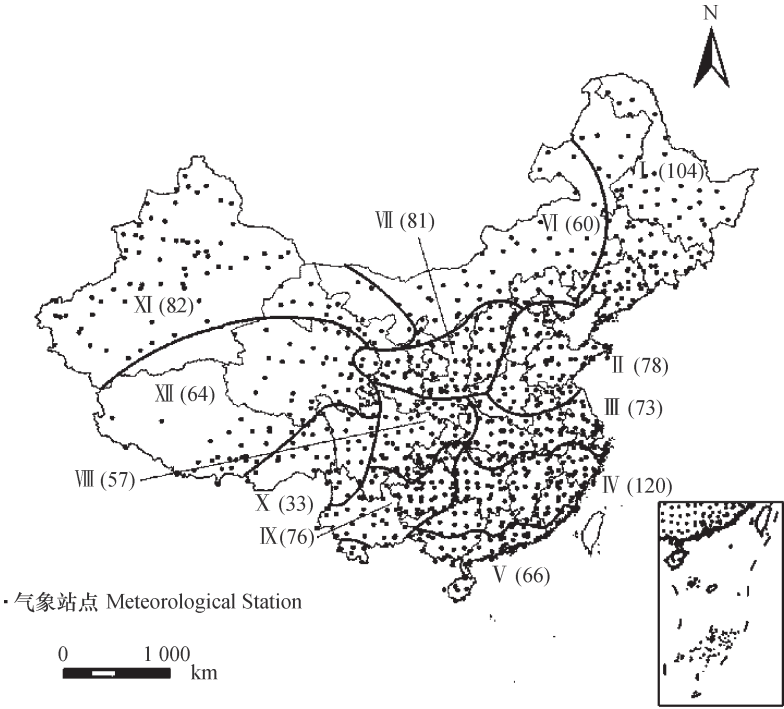
综上所述，国内对年均地温的估算研究存在气象站数量偏少和数据年份偏早的问题，且多采用统一的估算模型实现对全国年均地温地估测，亦缺乏对估算方法的比较分析。中国幅员辽阔，气候类型多样^[11-12]，不同区域年均地温与其影响因子存在不同的相关性^[13]，用统一的数学模型估算全国广大地区的年均地温误差较大。因此，需要在全国范围内分区域建立数学模型，以反映不同水热条件

和地貌条件下各区域的年均地温特征。本研究利用全国895个气象站的1981—2010年的数据，按照《GB/T 28407-2012 农用地质量分等规程》^[14]中的标准耕作制度一级分区，建立分区域的年均地温估算模型。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

数据来源于中国国家气象数据共享网《1981—2010年中国地面气候标准值年值数据集》。网站提供全国气象站927个，其中有32个处于海拔极端的山上，其气象数据与区域特点不符，不予采纳。故本研究下载并整理了895个气象站的累年年均气温，5、10、15、20和40累年年均地温，各气象站的经度、纬度、气象站观测场海拔高度和观测平台高度等数据。气象站覆盖范围为：75.14° E（虎林）~132.58° E（塔什库尔干），



注：I：东北区；II：黄淮海区；III：长江中下游区；IV：江南区；V：华南区；VI：内蒙古高原及长城沿线区；VII：黄土高原区；VIII：四川盆地；IX：云贵高原区；X：横断山脉区；XI：西北区；XII：青藏高原区。括号内数值为本研究采用的各分区气象站点数
Note: I：Northeast China；II：the Huang-Huai-Hai region；III：the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River；IV：Jiangnan region；V：South China；VI：Inner Mongolia and zones alongside the Great Wall；VII：Loess Plateau；VIII：Sichuan Basin；IX：Yunnan-Guizhou Plateau；X：Hengduan Mountain Region；XI：Northwest China；XII：Qinghai-Tibet Plateau. Values in brackets denote number of meteorological stations in each zone cited by the study

图1 象站点分布及标准耕作制度一级分区

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and Garde I standard farming system zones

<http://pedologica.issas.ac.cn>



16.32° N (珊瑚) ~ 52.58° N (漠河); 海拔 2.4 m (秦皇岛) ~ 4 800 m (安多)。气象站分布见图1。全国年均地温估算模型按照《GB/T 28407-2012 农用地质量分等规程》确定的12个一级标准耕作制度区(图1)分区建立。

1.2 研究方法

回归方程法^[15-18]。研究表明, 年均地温主要受年均气温的影响, 也不同程度地受纬度、经度、海拔高度、年均风速、年降水量等因素的影响。由于年降水量影响较小^[8], 年均风速数据较难获取, 因此本研究利用SPSS Statistics 17.0建立年均地温与年均气温、纬度、经度和海拔高度的多元回归方程, 用以估算年均地温。

年均地气温差平均值法^[19]。分区计算各气象站同深度年均地温与年均气温差的平均值, 即年均地气温差平均值 α (°C), 再利用公式(1)估算已知年均气温点的年均地温。

$$\hat{y} = \alpha + x \quad (1)$$

式中, $\hat{y}$ 为估算点的年均地温(°C); x 为估算点的年均气温(°C)。

2 结 果

2.1 年均气温与年均地温特征

分区统计全国895个气象站年均气温和年均地温的基本情况发现: 各区5~40 cm内各深度年均地温均高于相应气象站的年均气温。在全国范围内, 自北向南, 即由东北区和内蒙古高原及长城沿线区过渡到华南区和云贵高原区, 年均气温和各深度年均地温均逐渐增大。自东向西, 由东北区经内蒙古高原及长城沿线区到西北区, 年均气温和年均地温逐渐增大; 由长江中下游区到四川盆地, 年均气温稍有下降, 年均地温变化很小; 由江南区至云贵高原区, 年均地温和年均气温均稍有下降。年均地温最高值, 西北区出现在5~10 cm, 华南区在40 cm, 江南区在15~40 cm, 其他分区均在15 cm和/或20 cm。各区5~20 cm年均地温的变化较小, 各深度的变化黄土高原区为0.3°C, 内蒙古高原及长城沿线区和西北区为0.2°C, 其他各区均为0.1°C; 40和20 cm深度年均地温比较, 除了华南区升高(0.1°C)和江南区不变外, 其他各区40 cm的年均地温均低于20 cm年均地温, 且东北区、内蒙古高原及长城沿线区、云贵高原区和西北区变化

较大(1.0~2.9°C), 青藏高原区降低0.5°C, 其他区均降低0.3~0.1°C。

同一分区内, 不同深度的年均地气温差平均值在5~20 cm深度内变化不大(0.1°C), 在20~40 cm深度变化较大, 特别是内蒙古高原及长城沿线区和青藏高原区达0.4°C(表1)。说明年均地温与年均气温不是简单的线性变化关系, 还受其他因素影响。各分区之间比较, 年均地气温差平均值的变化较大, 20 cm深度为1.4~3.9°C, 40 cm深度为1.1~4.3°C。

中国经纬度跨度大, 不同分区之间, 年均地气温差平均值存在一定的地域差异性(表1)。自北向南, 由东北区至黄淮海区, 年均地气温差平均值减小(20 cm年均地气温差平均值 α 由2.1°C减小至1.4°C), 由黄淮海区至华南区, 年均地气温差平均值逐渐增大(20 cm年均地气温差平均值 α 由1.4°C增加至2.2°C)。由东北区至黄淮海区年均地气温差平均值减小的原因是: 东北大部分地区的海拔普遍高于黄淮海区, 海拔降低, 导致年均气温升高, 但年均地温受海拔变化的影响小于气温^[8], 所以, 年均地温的升温幅度小于年均气温, 年均地气温差平均值减小。由黄淮海区至华南区年均地气温差平均值逐渐增大的原因是: 随纬度逐渐降低, 一年内高温的持续时间逐渐增加, 降水逐渐增多, 土壤湿润且贮存热量的时间延长, 一年内地温较气温的波动小, 导致越向南, 年均地温的升温幅度越大于年均气温, 年均地气温差平均值逐渐增大。纬度相近的分区, 从东向西年均地气温差平均值逐渐增大, 如长江中下游区—四川盆地—横断山脉区(20 cm年均地气温差平均值 α 由1.4°C增加至3.6°C), 原因是: 中国的地貌呈阶梯状分布^[20], 自东向西, 海拔逐渐升高, 年均气温降低, 但年均地温受海拔变化的影响小于气温^[8], 致使年均地温的降温幅度小于年均气温, 年均地气温差平均值逐渐增大。

2.2 年均地温估算模型

各分区内, 建模气象站年均地温数据的分布特征存在一定差异, 但偏度和峰度均小于1, 且均通过K-S检验, 表明数据分布近似为正态分布, 在各区均可建立回归方程对年均地温进行估算。

2.2.1 回归方程法 利用相应气象站的年均气温、纬度、经度、海拔数据, 分区建立估算20 cm、40 cm年均地温的回归方程(表2)。

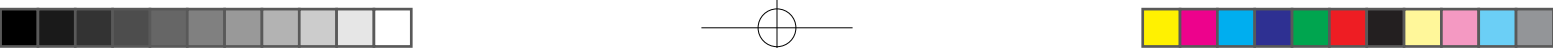


表1 各分区不同深度的年均地气温差平均值 α （℃）

Table 1 Mean difference between mean annual soil and air temperatures α （℃）relative to soil depth and zone										
分区Partition	0 ~ 5 cm		5 ~ 10 cm		10 ~ 15 cm		15 ~ 20 cm		20 ~ 40 cm	
	α	n	α	n	α	n	α	n	α	n
东北区 Northeast China	2.1	27	2.1	27	2.2	27	2.1	27	2.2	61
黄淮海区 The Huang-Huai-Hai region	1.3	66	1.3	66	1.4	66	1.4	66	1.1	36
长江中下游区 The middle and lower reaches of the Yangtze River	1.3	68	1.3	68	1.4	68	1.4	68	1.3	29
江南区 Jiangnan region	1.7	103	1.7	103	1.8	103	1.8	103	1.7	31
华南区 South China	2.1	44	2.1	44	2.2	44	2.2	44	2.2	17
内蒙古高原及长城沿线区 Inner Mongolia and zone along the Great Wall	2.0	21	2.0	21	2.1	21	2.1	21	2.5	47
黄土高原区 Loess Plateau	1.7	71	1.8	71	1.9	71	1.9	71	2.0	37
四川盆地 Sichuan Basin	1.6	40	1.6	40	1.7	40	1.7	40	1.5	15
云贵高原区 Yunnan-Guizhou Plateau	2.1	70	2.1	70	2.2	70	2.2	70	2.2	19
横断山脉区 Hengduan mountain region	3.5	19	3.6	19	3.6	19	3.6	19	3.4	4
西北区 Northwest China	2.7	42	2.6	42	2.6	42	2.6	42	2.8	60
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau	3.9	39	3.9	39	4.0	39	3.9	39	4.3	23

注： n 为样本数 Note: n denotes number of samples

2.2.2 年均地气温差平均值法 将20 cm和40 cm年均地气温差平均值（表1）代入公式（1），分别得到相应深度年均地温的估算方程（表3）。

2.2.3 估算模型的准确性检验 对20 cm和40 cm年均地温的两种估算方程进行精度检验，结果（表4）表明：无论是20 cm还是40 cm年均地温，多数分区的回归方程法的估算误差 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$ ，但青藏高原区和内蒙古高原及长城沿线区的估算误差 $\geq 0.3^{\circ}\text{C}$ ，青藏高原区泽当站的估算误差达到 0.9°C 。各分区年均地气温差平均值法的检验结果均不够准确，只有少量站点的估算误差 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$ ，东北区、横断山

脉区、西北区、青藏高原区、内蒙古高原及长城沿线区等1/3以上的站点检验误差 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ，20 cm年均地温误差最大的是东北区、横断山脉区和西北区，达到 0.8°C ；40 cm年均地温误差最大的是青藏高原区、西北区和东北区，达到 1.0°C 以上，青藏高原区的泽当站为 1.8°C 。比较而言，回归方程法在大部分分区均有更高的准确性。年均地气温差平均值法的准确性虽低于回归方程法，但计算过程简便，实用性较高。在年均地气温差平均值法的误差 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 的长江中下游区、江南区、四川盆地及云贵高原区，也可使用该方法进行粗略估算。

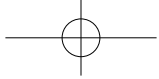


表2 估算20 cm和40 cm年均地温的回归方程

Table 2 Equations for estimation of mean annual soil temperature at 20 cm and 40 cm in depth

分区 Partition	样本数 Sample size	估算方程 Estimation equation	R^2
20 cm			
东北区 Northeast China	27	$y=23.690+0.578x_1-0.137x_2-0.104x_3+0.001x_4$	0.96**
黄淮海区 The Huang-Huai-Hai region	66	$y=14.675+0.529x_1-0.293x_2+0.031x_3+0.001x_4$	0.95**
长江中下游区 The middle and lower reaches of the Yangtze River	68	$y=18.321+0.565x_1-0.233x_2-0.023x_3+0.003x_4$	0.91**
江南区 Jiangnan region	103	$y=0.612+0.872x_1-0.189x_2+0.075x_3$	0.94**
华南区 South China	44	$y=-5.622+1.329x_1-0.118x_2+0.025x_3+0.002x_4$	0.89**
内蒙古高原及长城沿线区 Inner Mongolia and zone along the Great Wall	21	$y=13.157+0.789x_1+0.033x_2-0.093x_3$	0.96**
黄土高原区 Loess Plateau	71	$y=12.919+0.673x_1-0.201x_2+5.732e-5x_3$	0.98**
四川盆地区 Sichuan Basin	40	$y=5.948+0.762x_1+0.001x_2-0.001x_4$	0.96**
云贵高原区 Yunnan-Guizhou Plateau	70	$y=13.318+0.979x_1-0.031x_2-0.096x_3$	0.97**
横断山脉区 Hengduan mountain region	19	$y=12.751+0.959x_1-0.159x_2-0.070x_3+0.001x_4$	0.98**
西北区 Northwest China	42	$y=18.151+0.773x_1-0.271x_2-0.012x_3-0.001x_4$	0.92**
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau	39	$y=15.483+0.847x_1-0.089x_2-0.075x_3$	0.96**
40 cm			
东北区 Northeast China	61	$y=31.591+0.271x_1-0.424x_2-0.050x_3-0.003x_4$	0.97**
黄淮海区 The Huang-Huai-Hai region	36	$y=28.605+0.363x_1-0.342x_2-0.054x_3-0.003x_4$	0.93**
长江中下游区 The middle and lower reaches of the Yangtze River	29	$y=18.894+0.480x_1-0.411x_2+0.030x_3+0.004x_4$	0.94**
江南区 Jiangnan region	31	$y=-5.784+1.015x_1+0.013x_2+0.055x_3+0.004x_4$	0.95**
华南区 South China	17	$y=-6.437+1.294x_1-0.234x_2+0.062x_3+0.002x_4$	0.87**
内蒙古高原及长城沿线区 Inner Mongolia and zone along the Great Wall	47	$y=35.846+0.462x_1-0.247x_2-0.160x_3-0.002x_4$	0.97**
黄土高原区 Loess Plateau	37	$y=10.633+0.710x_1-0.155x_2+6.085e-5x_3$	0.97**
四川盆地区 Sichuan Basin	15	$y=15.761+0.668x_1-0.104x_2-0.051x_3-0.001x_4$	0.99**
云贵高原区 Yunnan-Guizhou Plateau	19	$y=32.318+0.666x_1-0.124x_2-0.192x_3-0.001x_4$	0.96**
横断山脉区 Hengduan mountain region	4	$y=32.935+0.542x_1-1.578x_2+0.232x_3$	1
西北区 Northwest China	60	$y=13.791+0.681x_1-0.170x_2+0.003x_3-0.001x_4$	0.92**
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau	23	$y=33.172+0.569x_1-0.275x_2-0.130x_3-0.002x_4$	0.98**

注: x_1 为年均气温, x_2 为纬度, x_3 为经度, x_4 为海拔, y 为年均地温, **表示 $p < 0.01$ 水平上显著相关 Note: x_1 denotes mean annual air temperature, x_2 denotes latitude, x_3 denotes longitude, x_4 denotes altitude, y denotes mean annual soil temperature,

** Significant at $p < 0.01$

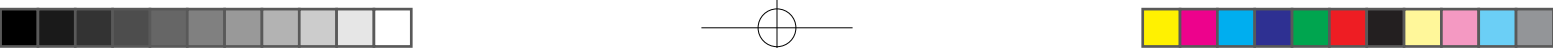


表3 基于年均地气温差平均值的20 cm和40 cm年均地温估算方程

Table 3 Equations for estimation of mean annual soil temperature at 20 cm and 40 cm based on mean difference between mean annual soil and air temperatures

分区 Partition	20 cm		40 cm	
	样本数	估算方程	样本数	估算方程
	Sample size	Estimationequation	Sample size	Estimationequation
东北区 Northeast China	27	$y=x+2.1$	61	$y=x+2.2$
黄淮海区 The Huang-Huai-Hai region	66	$y=x+1.4$	36	$y=x+1.1$
长江中下游区 The middle and lower reaches of the Yangtze River	68	$y=x+1.4$	29	$y=x+ 1.3$
江南区 Jiangnan region	103	$y=x+1.8$	31	$y=x+1.7$
华南区 South China	44	$y=x+2.2$	17	$y=x+2.2$
内蒙古高原及长城沿线区 Inner Mongolia and zone along the Great Wall	21	$y=x+2.1$	47	$y=x+2.5$
黄土高原区 Loess Plateau	71	$y=x+1.9$	37	$y=x+2.0$
四川盆地区 Sichuan Basin	40	$y=x+1.7$	15	$y=x+1.5$
云贵高原区 Yunnan-Guizhou Plateau	70	$y=x+2.2$	19	$y=x+2.2$
横断山脉区 Hengduan mountain region	19	$y=x+3.6$	4	$y=x+3.4$
西北区 Northwest China	42	$y=x+2.6$	60	$y=x+2.8$
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau	39	$y=x+3.9$	23	$y=x+4.3$

3 讨 论

3.1 影响估算模型准确性的因素

对895个气象站5 ~ 40 cm年均地温随深度增加的变化趋势逐一进行统计归类，发现除东北区和黄土高原区外，其他同一分区内各气象站的年均地温随深度增加并未表现出同向的变化规律，在同一深度范围内出现了两种甚至三种（青藏高原区）不同的变化趋势（表5）。这就使得由已知气象站数据计算的分区年均地气温差平均值，受区内数据量及气象站分布的影响极大。由于中国国家气象数据共享网提供的气象站和相关数据数量有限，分区计

算的年均地气温差平均值不能很好地反映分区特征，因此影响了年均地气温差平均值法估算结果的准确性。

虽然应用回归方程法建立的各分区估算方程均表现为极显著相关（表2），但由于个别分区内气象站点密度小，分区内的异质性也会造成个别估算点估算值误差偏大的情况。黄淮海区、长江中下游区、江南区和华南区：地貌类型以低海拔平原和丘陵山地为主^[21]，各区范围较小，用于建模的气象站点在区内分布均匀，回归方程在区内各地方均能取得较高的估算准确性。东北区：大、小兴安岭地带受冬季冻土影响，用于建模的年均地温数据较



表4 年均地温估算方法的准确性检验

Table 4 Accuracy test of the methods for estimation of mean annual soil temperature

分区 Partition	验证站点 Validation sites	20 cm			40 cm		
		观测值 Observation	M1	M2	观测值 Observation	M1	M2
东北区 Northeast China	大洼Dawa	10.9	10.9	11.6	10.5	10.6	11.7
	营口Yingkou	11.1	11.1	11.9	10.9	11.0	12.0
黄淮海区 The Huang-Huai-Hai region	淄博 Zibo	15.1	15.2	15.6	14.7	14.8	15.3
	亳州Bozhou	16.5	16.5	16.5	16.4	16.3	16.2
长江中下游区 The middle and lower reaches of the Yangtze River	湖州Huzhou	17.8	17.7	17.7	17.7	17.8	17.6
	黄石Huangshi	18.6	18.6	18.9	18.5	18.5	18.8
江南区 Jiangnan region	吉安 Ji'an	20.3	20.4	20.5	20.2	20.1	20.4
	祁门Qimen	18.0	17.9	17.9	18.1	18.0	17.8
华南区 South China	玉林Yulin	24.2	24.2	24.4	24.1	24.0	24.4
	灵山Lingshan	23.7	23.6	24.0	23.3	23.4	24.0
内蒙古高原及长城沿线区 Inner Mongolia and zone along the Great Wall	银川 Yinchuan	11.7	12.0	11.6	11.3	11.6	12.0
	伊金霍洛旗EjinHoro Banner	9.4	9.6	9.0	9.5	9.2	9.4
黄土高原区 Loess Plateau	天镇Tianzhen	9.3	9.5	8.9	9.2	9.3	9.0
	侯马 Houma	14.4	14.5	14.8	14.3	14.3	14.9
四川盆地区 Sichuan Basin	成都 Chengdu	17.7	17.8	18	17.8	17.7	17.8
	宜宾Yibin	19.2	19.3	19.7	19.2	19.2	19.5
云贵高原区 Yunnan-Guizhou Plateau	蒙自 Mengzi	21.3	21.3	21.2	21.1	21.0	21.2
	都匀Duyun	18.0	18.1	18.5	18.3	18.4	18.5
横断山脉区 Hengduan mountain region	林芝Linzhi	13.3	13.2	12.7	13.3	13.4	12.5
	马尔康Maerkang	11.6	11.7	12.4	11.6	11.6	12.2
西北区 Northwest China	张掖Zhangye	11.2	11.1	10.4	11.3	11.4	10.6
	喀什 Kashi	14.8	14.8	14.9	14.1	14.2	15.1
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau	河南 Henan	4.0	4.5	3.6	3.8	3.4	4.0
	泽当Zedang	12.9	13.8	13.1	11.7	11.4	13.5

注：M1表示回归方程法，M2表示年均地气温差平均值法 Note: M1 denotes regression equation method; M2 denotes method based on mean difference between mean annual soil and air temperature

少，因此，回归方程法在大、小兴安岭地带的误差会增大。西北区：用于建模的气象站多集中于新疆地区，内蒙古西部和甘肃西部的气象站数量有限，且处于西北区的边缘位置，因此，回归方程法在内蒙古西部和甘肃西部的误差会增大。黄土高原区：

用于建模的气象站多数分布于地势较高的黄土丘陵区与黄土塬区，因此，回归方程在东南部海拔较低的洛阳一带误差会增大。四川盆地区和云贵高原区：区内几乎全部为山地，以中、大起伏亚高山和大起伏中山占最多^[21]，海拔高度差异大，而用于

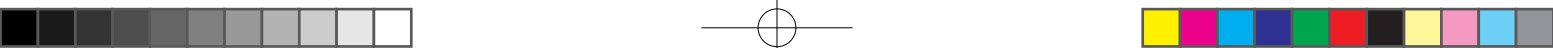


表5 各分区气象站点年均地温随深度增加的变化趋势

Table 5 Trend of the change in mean annual soil temperature with depth at meteorological stations relative to zone				
分区 Partition	深度 Depth (cm)			
	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 40
东北区 Northeast China	下降	上升	下降	下降
黄淮海区 The Huang-Huai-Hai region	上升/不变	上升/不变	不变	下降
长江中下游区 The middle and lower reaches of the Yangtze River	不变	上升/不变	不变	下降
江南区 Jiangnan region	上升	上升/不变	不变	下降/上升
华南区 South China	上升/不变	上升/不变	上升	下降
内蒙古高原及长城沿线区 Inner Mongolia and zone along the Great Wall	上升/不变	上升/不变	下降/不变	下降/上升
黄土高原区 Loess Plateau	上升	上升	不变	上升
四川盆地区 Sichuan Basin	不变	上升/不变	不变	下降
云贵高原区 Yunnan-Guizhou Plateau	上升	上升/不变	不变	上升/不变
横断山脉区 Hengduan mountain region	上升/不变	不变	下降	不变
西北区 Northwest China	下降	下降	下降/不变	下降/上升
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau	上升/不变/下降	上升/不变/下降	不变	上升

建模的气象站的40 cm年均地温数据相对较少，因此，回归方程很难准确地反应不同海拔高度的年均地温状况。青藏高原区和内蒙古高原及长城沿线区的地理面积很大，但气象站的分布相对稀疏，建模站点在这两个区域的分布密度低且分布不均匀，因此，回归方程法的整体误差较大。横断山脉区：用于40 cm年均地温建模的气象站数只有4个，虽然回归方程的相关性达到了1，验证点林芝站40 cm年均地温的估算误差也较小（0.1℃），但并不等于该分区任一点的估算值均能比较准确，因为4个站数据建立的模型对于广大的区域范围实在是太少了。

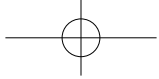
综上所述，用于建模气象站的年均地温数据量、在标准耕作制度区中的分布位置和密度，均会影响回归方程法的准确性。而制约气象站的分布

和气象资料获取的主要因素则是环境条件。如在青藏高原，最主要的地貌组合特征是由一系列近5 500 ~ 6 500 m的大起伏和极大起伏的高山、极高山组成的巨大山系与高位盆地、谷地构成的山地—盆地系统^[21]；在新疆南部，95%以上的土地为沙漠和戈壁^[22]；东北地区漠河一带土壤存在长期的冻土现象。这些地区的气候环境条件较为极端，气象站的分布相对较少，能获取的气象数据资料更少，实际很难以该类地区建立回归方程估算年均地温。因此，本研究建立的回归方程更适用于气象站密度较大、海拔差异较小、适于农业耕作的地区。如果有条件获取更多的气象数据，在本研究分区的基础上作适当细分，建立的回归模型将会更准确。



表6 5~40 cm年均地温变化量的统计特征 (℃)

Table 6 Statistical characteristics of the variation in magnitude (℃) of mean annual soil temperature with soil depth from 5 cm to 40 cm						
分区 Partition	项目 Item	深度 Depth (cm)				
		5 ~ 10	10 ~ 15	5 ~ 20	20 ~ 40	
					总变化量 Total variable quantity	总变化量/4 Total variable Quantity/4
东北区 Northeast China	均值Mean	0.2	0.2	0.1	0.3	0.1
	极大值Max	0.5	0.5	0.4	0.9	0.2
	极小值Min	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
黄淮海区 TheHuang-Huai-Hai region	均值Mean	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1
	极大值Max	0.2	0.2	0.1	0.7	0.2
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
长江中下游区 The middle and lower reaches of the Yangtze River	均值Mean	0.1	0.1	0.0	0.3	0.1
	极大值Max	0.2	0.3	0.1	0.6	0.2
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
江南区 Jiangnan region	均值Mean	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1
	极大值Max	0.2	0.3	0.1	0.6	0.2
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
华南区 South China	均值Mean	0.0	0.1	0.1	0.4	0.1
	极大值Max	0.1	0.4	1.1	0.9	0.2
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
内蒙古高原及长城沿线区 Inner Mongolia and zone along the Great Wall	均值Mean	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1
	极大值Max	0.2	0.3	1.6	0.6	0.2
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
黄土高原区 Loess Plateau	均值Mean	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
	极大值Max	0.4	0.7	0.2	0.7	0.2
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
四川盆地区 Sichuan Basin	均值Mean	0.4	0.1	0.0	0.2	0.1
	极大值Max	0.2	0.4	0.1	0.6	0.2
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
云贵高原区 Yunnan-Guizhou Plateau	均值Mean	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1
	极大值Max	0.4	0.2	0.2	1.0	0.3
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
横断山脉区 Hengduan mountain region	均值Mean	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0
	极大值Max	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
西北区 Northwest China	均值Mean	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1
	极大值Max	0.4	0.3	0.1	0.9	0.2
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau	均值Mean	0.1	0.1	0.0	0.4	0.1
	极大值Max	0.3	0.1	0.1	1.2	0.3
	极小值Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



3.2 探讨“中国土壤系统分类”中土壤温度状况诊断标准

全国各分区5、10、15、20和40年均地温数据完整的气象站共有262个，对这些气象站5~40 cm年均地温变化量的绝对值进行统计（表6）。在5~20 cm深度范围内每5 cm年均地温变化量的均值随深度的增加，东北区、长江中下游区、云贵高原区、西北区和青藏高原区表现为逐渐减小，黄淮海区、黄土高原区和四川盆地区表现为先增大后减小，江南区和横断山脉区表现为先减小后增大，华南区、内蒙古高原及长城沿线区表现为逐渐增大；多数分区均值的变化量 $\leq 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，极大值的变化量不稳定，变化范围为 $0.1\sim 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可能因接近地表，除在当地气温的影响下，还受地表覆被、土壤颗粒组成、土壤含水量等综合因素的影响。在20~40 cm范围内，所有区域每5 cm年均地温变化量的均值均 $\leq 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，极大值的变化量较0~20 cm深度稳定，多数分区 $\leq 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，青藏高原区和云贵高原区最大，达 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由此推测，对于单一估算点，40 cm和50 cm的年均地温最大差距 $\leq 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，在中国没有50 cm年均地温实测数据的情况下，“中国土壤系统分类”可以考虑用40 cm的地温代替50 cm的地温。

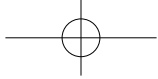
4 结 论

全国范围内，5~40 cm各深度年均地温均高于相应气象站的年均气温。同一标准耕作制度一级分区内，各气象站5~40 cm年均地温随深度增加没有表现出同向变化规律；不同深度的年均地气温差平均值在5~20 cm深度内变化 $\leq 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，在20~40 cm深度变化较大，个别分区达 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本研究建立各标准耕作制度一级分区年均地温的估算方程，年均地气温差平均值法在部分地区的准确性较低，仅推荐在长江中下游区、江南区、四川盆地区及云贵高原区使用；回归方程法除青藏高原区和内蒙古高原及长城沿线区外，其他各区的准确性较高，而且在气象站密度较大、海拔差异较小、在适于农业耕作的地区应用会取得更满意的精度。对各标准耕作制度一级分区5~40 cm年均地温随深度的变化规律分析表明：中国土壤系统分类可以考虑用40 cm的地温代替50 cm的地温。

参考文献

- [1] Bai Y, Scott T A, Chen W, et al. Evaluating methods for measuring the mean soil temperature. *Geoderma*, 2010, 157 (3/4) : 222—227
- [2] 冯秀藻, 陶炳炎. 农业气象学原理. 北京: 气象出版社, 1991: 72—150
Feng X Z, Tao B Y. Principle of agrometeorology (In Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991: 72—150
- [3] Plauborg F. Simple model for 10 cm soil temperature in different soils with short grass. *European Journal of Agronomy*, 2002, 17: 173—179
- [4] 史学正, 邓西海. 我国土壤温度状况//龚子同. 中国土壤系统分类进展. 北京: 科学出版社, 1993: 353—360
Shi X Z, Deng X H. Soil temperature regime in China//Gong Z T. Research on Chinese Soil Taxonomy (In Chinese). Beijing: Science Press, 1993: 353—360
- [5] 陈健飞. 土壤水分和温度状况的估算. *土壤*, 1989, 21 (3) : 160—162
Chen J F. Estimation of regime of the soil moisture and temperature (In Chinese). *Soils*, 1989, 21 (3) : 160—162
- [6] 冯学民, 蔡德利. 土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究. *土壤学报*, 2004, 41 (3) : 489—491
Feng X M, Cai D L. Soil temperature in related to air temperature, altitude and latitude (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (3) : 489—491
- [7] 张之一, 辛刚. 黑龙江省土壤温度与气温和纬度及海拔的相关关系. 中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会, 2004
Zhang Z Y, Xin G. Soil temperature in related to air temperature, altitude and latitude in Heilongjiang Province (In Chinese). The Tenth National Congress of Soil Science Society of China and the Fifth Symposium on Soil Fertilizer Academic Exchange between both side s of the Taiwan Straits, 2004
- [8] 杨学明, 赵兰波, 罗小红. 土壤系统分类中年均土壤温度的计算//龚子同. 中国土壤系统分类新论. 北京: 科学出版社, 1994: 400—404
Yang X M, Zhao L B, Luo X H. Calculate of mean annual soil temperature of Soil Taxonomy //Gong Z T. Theory of Chinese Soil Taxonomy (In Chinese). Beijing: Science Press, 1994: 400—404
- [9] Evrendilek F, Karakaya N, Gungor K, et al. Satellite-based and mesoscale regression modeling of monthly air and soil temperatures over complex terrain in Turkey.

- Expert Systems with Applications, 2012, 39: 2059–2066
- [10] 张慧智, 史学正, 于东升, 等. 中国土壤温度的空间插值方法比较. 地理研究, 2008, 27 (6) : 1299—1307
Zhang H Z, Shi X Z, Yu D S, et al. Spatial prediction of temperatures in China using different methods (In Chinese) . Geographical Research, 2008, 27 (6) : 1299—1307
- [11] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. 地理学报, 2010, 65 (1) : 3—13
Zheng J Y, Yin Y H, Li B Y. Anew scheme for climate regionalization in China (In Chinese) . Acta Geographica Sinica, 2010, 65 (1) : 3—13
- [12] 刘庆花, 史学正, 于东升, 等. 土壤区划类型的参比与属地化研究. 地理科学, 2006, 26 (2) : 217—223
Liu Q H, Shi X Z, Yu D S, et al. Soil type reference and administrative area for soil regionalization in China (In Chinese) . Scientia Geographica Sinica, 2006, 26 (2) : 217—223
- [13] 张慧智, 史学正, 于东升, 等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究. 土壤学报, 2009, 46 (2) : 227—234
Zhang H Z, Shi X Z, Yu D S, et al. Seasonal and regional variations of soil temperature in China (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (2) : 227—234
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农用地质量分等规程 (GB/T 28407—2012) . 北京: 中国标准出版社, 2012
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People' s Republic of China, Standardization Administration of the People' s Republic of China (In Chinese) . Regulation for gradation on agriculture land quality (GB/T 28407—2012) . Beijing: China Standards Press, 2012
- [15] 陈超, 周广胜. 1961—2010年桂林气温和地温的变化特征. 生态学报, 2013, 33 (7) : 2043—2053
Chen C, Zhou G S. Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 (In Chinese) . Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (7) : 2043—2053
- [16] 姜会飞, 廖树华, 叶尔克江, 等. 地面温度与气温关系的统计分析. 中国农业气象, 2004, 25 (3) : 1—4
Jiang H F, Liao S H, ERIKE, et al. Statistical analysis on relationship between soil surface temperature and air temperature (In Chinese) . Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 25 (3) : 1—4
- [17] 杨学明. 土壤水热状况与土壤系统分类. 土壤, 1989, 21 (2) : 110—113
Yang X M. The regime of soil moisture and temperature and soil taxonomy (In Chinese) . Soils, 1989, 21 (2) : 110—113
- [18] 张慧智, 史学正, 于东升, 等. 中国土壤温度的空间预测研究. 土壤学报, 2009, 46 (1) : 1—8
Zhang H Z, Shi X Z, Yu D S, et al. Spatial prediction of soil temperature in China (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (1) : 1—8
- [19] 林世如, 杨心仪. 土壤系统分类中年平均土温的判定. 土壤, 1990, 22 (1) : 41—42
Lin S R, Yang X Y. Decision of mean annual soil temperature in Soil Taxonomy (In Chinese) . Soils, 1990, 22 (1) : 41—42
- [20] 郭子良, 崔国发. 中国地貌区划系统——以自然保护区体系建设为目标. 生态学报, 2013, 33 (19) : 6264—6276
Guo Z L, Cui G F. Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system (In Chinese) . Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (19) : 6264—6276
- [21] 李炳元, 潘保田, 程维明, 等. 中国地貌区划新论. 地理学报, 2013, 68 (3) : 291—306
Li B Y, Pan B T, Cheng W M, et al. Research on geomorphological regionalization of China (In Chinese) . Acta Geographica Sinica, 2013, 68 (3) : 291—306
- [22] 李新华. 影响新疆南部地区环境变化的因素分析. 干旱区研究, 2012, 29 (3) : 534—540
Li X H. Analyses on factors affecting ecological environment change in South Xinjiang (In Chinese) . Arid Zone Research, 2012, 29 (3) : 534—540

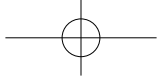


Methods for Estimation of Mean Annual Soil Temperature in China

HAN Chunlan YU Wuji LIU Jinbao FU Xiaomei ZHAO Liting

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract 【Objective】 Mean annual soil temperature is an important physical property of soil and of great significance to regional agricultural production. The purpose of this study is to explore regional characteristics of mean annual soil temperature relative to soil depth in China, and define an applicable method for accurate estimation of mean annual soil temperature. 【Method】 Ground meteorological data accumulated in the 895 meteorological stations in China during the period from 1980 to 2010 were collated and mean annual soil temperature analyzed based on zoning by Grade I standard farming system in China. Two methods were tested for estimation of mean annual soil temperature in China. The first one is a multiple regression equation established on the basis of SPSS Statistics 17.0 for regression of mean annual soil temperature with mean annual air temperature, latitude, longitude and altitude, and the second one is to estimate mean annual soil temperature based on the mean annual air temperatures and regional mean air temperature already available. 【Result】 Results show that the mean annual soil temperature in various soil layers 5 to 40 cm in depth in all the regions was higher than the mean annual air temperature monitored at the meteorological stations of corresponding regions. In the same meteorological zone, regardless of meteorological stations, mean annual soil temperature varied with soil depth within 5 ~ 40 cm, but the variation did follow the same trend. Mean annual soil and air temperatures differed in the range of $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$ in all the soil layers from 5 to 20 cm in depth, but varied more, significantly in the soil layers from 20 to 40 cm in depth, and the difference in some individuals zones reached 0.4°C . Comparison between meteorological zones shows that the difference between mean annual soil and air temperatures varied regionally, that is, declining first and then rising from north to south, and gradually increasing from east to west; in some zones the difference varied in the range of $1.4 \sim 3.9^{\circ}\text{C}$ at 20 cm in soil depth and in the range of $1.1 \sim 4.3^{\circ}\text{C}$ at 40 cm in soil depth. Compared with the estimation model based on zoning by Grade I standard farming system, the regression equation was higher in accuracy, but it was not so significant in the Qinghai-Tibet Plateau, Inner Mongolia and zones alongside the Great Wall. Analysis of the data of mean annual soil temperatures in soil layers at 5, 10, 15, 20 and 40 cm in depth at all the 262 meteorological stations that had kept complete data shows that in the soil layers 5 ~ 40 cm in depth, mean annual soil temperature varied in the range of $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$ at 5 cm and much less in the soil layers 20 ~ 40 cm in depth. Based on a single estimation site, the estimated mean soil temperature in the soil layer at 50 cm differed from the value at 40 cm to the extreme by $\leq 0.4^{\circ}\text{C}$. 【Conclusion】 The estimation of mean annual soil temperature using the mean annual soil and air temperature difference method is quite low in accuracy and the method is recommended for use only in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Jiangnan region, Sichuan Basin and Yunnan-Guizhou Plateau, and the regression equation method is quite high in accuracy in all the zones of Grade I standard farming system, except for Qinghai-Tibet Plateau, Inner Mongolia and zones alongside the Great Wall. In farming zones where the distribution of meteorological stations is dense and little in elevation variation, the regression equation based model is the



more higher in accuracy with little variation in mean annual soil temperature in the soil layer 40 ~ 50 cm in depth. Therefore, it is advisable to use the soil temperature at 40 cm to replace that at 50 cm in the prevailing “Chinese Soil Taxonomy” .

Key words Mean annual soil temperature; Soil temperature; Prediction model; Regional variation

(责任编辑：檀满枝)