

# 西藏那曲地区土壤温度变化特征 及其与环境关系研究

杨洪波<sup>1</sup>, 于晓丹<sup>1</sup>, 付海美<sup>2</sup>, 李慧婷<sup>1</sup>, 赵晋灵<sup>1\*</sup>, 徐 妮<sup>1</sup>

1. 亿利生态修复股份有限公司, 北京 100022; 2. 北京市理化分析测试中心, 北京 100089

**摘 要:** 利用智墙 (IST.HRGC-16S) 监测了 2017 年 6 月–2019 年 9 月西藏那曲市 (31°33′49″N, 116°00′37″E) 不同土壤深度处 (0、10、20、30、40、50、60 cm) 每小时的土壤温度; 天圻气象站 (WS00G10A) 监测了 2 m 高度处每小时的空气温度、空气相对湿度、大气压力、风速、风向、降雨量和累计太阳辐射量等指标, 运用相关分析法分析了各层土壤温度与气象要素之间的关系。结果表明: (1) 西藏那曲地区土壤温度在–15–17.5 °C 之间波动, 土壤表层温度比深层随气温的变化明显; (2) 0–30 cm 深度的土壤温度昼夜变化较为明显, 呈现明显的波动周期, 而 30–60 cm 深度的土壤温度变化不大。在一定范围内, 土壤深度每增加 10 cm, 峰谷值滞后时间增加约 1 h; 昼夜温度波动性在代表月份中表现出冬季差值最大; (3) 随土层深度增加土壤温度年平均值和地积温呈现先增高后降低的趋势, 在土层深度 30 cm 处达到最大值, 分别为 4.27、1.557 °C。(4) 表层土壤温度对气象因子中空气温度、湿度、大气压、降雨量、累计太阳辐射强度的变化响应明显, 相关系数分别为 98%、91%、84%、75%、72%。研究结果揭示了那曲地区土壤温度变化规律及与环境关系, 为探讨藏北高原生态脆弱区植物生长及其土壤和环境的关系提供研究基础。

**关键词:** 土壤温度; 气象因子; 相关分析; 那曲地区

**DOI:** 10.3974/geodp.2020.02.07

## 数据可用性声明:

本文关联数据已出版, 可获取: 杨洪波, 于晓丹, 付海美等. 西藏那曲市土壤温度、气象要素及其相关系数数据集 (2017–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. DOI:10.3974/geodb.2020.03.03.V1.

## 1 前言

青藏高原作为世界上海拔最高的高原, 有着与其他地区不同的气候条件。太阳辐射强烈, 日照时数长, 气温低且昼夜温差大; 夏季温凉多雨, 冬季干冷漫长<sup>[1]</sup>。随着全球气候的变化, 西藏独特稳定的“微”环境也受到影响, 气候变化更为强烈<sup>[2–3]</sup>。近些年, 青藏高原年均气温以每年 0.026 °C 的速度增长<sup>[4]</sup>, 明显超出了全球气温的增长速度。该地区土壤增温明显, 土壤温度作为影响土壤中很多重要的物理、化学以及生物化学过程的关键变量

收稿日期: 2020-03-03; 修订日期: 2020-04-27; 出版日期: 2020-06-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2017YFC0506801); 国家自然科学基金 (41807105)

\*通讯作者: 赵晋灵, 亿利生态修复股份有限公司, zhaojinling@elion.com.cn

数据引用方式: [1] 杨洪波, 于晓丹, 付海美等. 西藏那曲地区土壤温度变化特征及其与环境关系研究[J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(2): 144–154. DOI: 10.3974/geodp.2020.02.07.

[2] 杨洪波, 于晓丹, 付海美等. 西藏那曲市土壤温度、气象要素及其相关系数数据集 (2017–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.03.03.V1.

之一<sup>[5-6]</sup>，决定着土壤的质量，影响着养分利用率和植物生长等<sup>[7]</sup>。由于植物的根系适应温度范围狭窄，对极端的土壤温度变化较为敏感<sup>[8]</sup>。大气和地面的热量输送，土壤温度不同程度增加会改变土壤碳库储量和营养物质（NPK 等）的收支平衡，影响土壤肥力<sup>[9-10]</sup>。所以，研究土壤温度是保证热量收支平衡和植被正常生长的基本前提。

西藏作为我国生态脆弱区一直倍受关注。在气候暖湿变化趋势下，更有必要在不同时间尺度上研究土壤温度变化及其与环境的响应关系。据报道，植物根系生长和生理活动及土壤生物活动主要取决于土壤温度，而土壤温度随着季节发生变化<sup>[7,11-12]</sup>。西藏那曲地区夏季多阴雨冰雹，冬春季多干旱大风，紫外线强且照射不均匀等现象导致不同地区甚至同一地区气候和土壤性质等有着很大的差异，加之那曲地区地域辽阔，地形地貌各异等诸多因素，使得土壤温度变化呈现不同的规律。本文着手于那曲中东部地区，建立气象站及温度监测站，在前人研究基础上，从不同的角度对那曲地区近些年的土壤温度垂直和瞬时变化进行分析，并寻找环境因素影响土壤温度时间节点。所以，针对近两年实测土壤温度和气象数据进行分析，阐明那曲地区土壤温度的变化特征，明确气象因子相关性大小。此研究对那曲地区植物生长发育及植物修复具有重要意义。

2 数据集元数据简介

《西藏那曲市土壤温度、气象要素及其相关系数数据集（2017–2019）》<sup>[13]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《西藏那曲市土壤温度、气象要素及其相关系数数据集（2017–2019）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	西藏那曲市土壤温度、气象要素及其相关系数数据集（2017–2019）
数据集短名	SoilTem_MeteoFac_Nagqu_2017-2019
作者信息	杨洪波, 亿利生态修复股份有限公司, 502952735@qq.com 于晓丹, 亿利生态修复股份有限公司, yuxiaodan2018@163.com 付海美 0000-0002-0245-1134, 北京市理化分析测试中心, dena1988@sina.com 李慧婷, 亿利生态修复股份有限公司, lihuiting@elion. com.cn 赵晋灵, 亿利生态修复股份有限公司, zhaojinling@elion. com.cn 徐妮, 亿利生态修复股份有限公司, xuweicuc@gmail. Com
地理区域	西藏那曲
数据年代	2017 年 6 月–2019 年 9 月
数据格式	.xlsx 数据量 2.67 MB（压缩后）
数据集组成	(1) 不同深度每小时、每日、每月的土壤温度数据（Tab.1–Tab.3） (2) 不同深度的土壤温度特征数据（Tab.4） (3) 每小时、每日、每月的气象要素数据，包括：气温、相对湿度、气压和降水量等（Tab.5–Tab.7） (4) 不同土壤深度的土壤温度与气象要素的相关系数数据（Tab.8）
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2017YFC0506800，2016YFC0500708）；国家自然科学基金（41807105）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所

续表

条 目	描 述
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[14]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref

3 数据采集方法

3.1 试验区概况

试验区位于西藏自治区那曲地区那曲县西北方向，距那曲县城约 30 km，中心坐标 31°33'49"N，116°00'37"E，紧邻京藏公路，交通便利。

那曲县属高原亚寒带季风半湿润气候区。平均海拔 4,500 m 以上，高寒缺氧，气候干燥，全年大风日 100 天左右，年平均气温为-2.2℃，最冷时可达-40℃，全年日照时数为 2,886 小时以上；一年中 5 至 9 月份相对温暖，年降水量 400 mm 以上。全年没有绝对无霜期，每年 10 月至次年 5 月为风雪期和土壤冻结期，6-8 月为生长期，全年植物生长期约 100 天。

3.2 数据采集

数据观测周期：2017 年 6 月 24 日-2019 年 9 月 30 日。

土壤环境监测方法：土壤观测仪器采用智墒（IST.HRGC-16S），从地表开始，每 10 cm 深度安装一个温、湿度探头，探头横向安装。监测频率为 1 次/小时。监测 0-60 cm 的土壤温度。

大气环境监测方法：大气观测仪器采用天圻气象站（WS00G10A），该仪器安装在试验区中心，无任何阻挡物的空地上，监测指标包括空气温度、相对湿度、大气压力、风速、风向、降雨量、太阳辐射，监测频率 1 次/小时。设置高度 2 m。

数据采用 SAS 8.0 和 SPSS 19.0 软件系统进行分析。

4 结果与分析

4.1 不同深度土壤温度年变化特征

4.1.1 土壤温度的垂直变化

表 2 为 2017 年 6 月-2019 年 9 月各层土壤温度的温差、年地积温、平均值、最大值和最小值。其中，温差随着土壤深度的增加逐渐减小，从地表（0 cm）至 40 cm，均有显著差异（ $P<0.05$ ），40 cm 以下，温差趋向稳定；平均值随着土壤深度的增加先升高后降低，最终趋于稳定；30 cm 土层温度平均值显著高于 0-20 cm 土壤温度（ $P<0.05$ ），30-60 cm 土层之间无差异；地积温随深度的增加也是先增加后降低，最后趋向稳定，且在 30 cm 土层

最大；土壤温度最大值和最小值随着土层深度的增加波动幅度减小。由此表明，土壤 30 cm 深度是一个温度转折点，有着较高且稳定的温度环境。

表 2 不同深度土壤温度差异性分析统计表

土层深度 (cm)	温差 (°C)	均值 (°C)	年地积温 (°C)	最大值 (°C)	最小值 (°C)
0	22.36a±0.33	1.99d±0.30	724.61	36.38	-24.69
10	8.47b±0.17	2.85c±0.27	1,040.94	29.56	-14.44
20	3.52c±0.09	3.36bc±0.25	1,227.54	22.31	-11.44
30	1.67d±0.04	4.27a±0.24	1,557.02	19.31	-8.94
40	0.89e±0.02	3.68ab±0.24	1,343.79	16.81	-8.44
50	0.44e±0.01	3.60ab±0.23	1,312.32	15.31	-7.63
60	0.27e±0.01	3.66ab±0.21	1,336.59	14.13	-6.69

注：温差为每天的最高温度与最低温度之差；均值为监测时期土壤温度平均值；最大、最小值为监测以来出现的最大、最小日均值。数据后不同字母表示同一列数据在  $P<0.05$  水平上差异显著，温差和均值的结果以平均值±标准误表示。

4.1.2 土壤温度的时间变化

各土层之间，土壤温度随时间的变化趋势一致（图 1）。土壤温度总体波动呈现类似于正（余）弦周期变化，振幅约为 11.3 °C；在 4–10 月份期间，土层之间温度相差不大，但在 10 月至次年 3 月，各层土壤温度变化剧烈，尤其是地表温度，但随着土层深度增加振幅变化减小；土壤温度在 10 月份发生突变，迅速下降了约 14 °C，使得 10 月成为变化最大的月份；从 4 月份开始，温度大于 0 °C，土壤开始解冻。

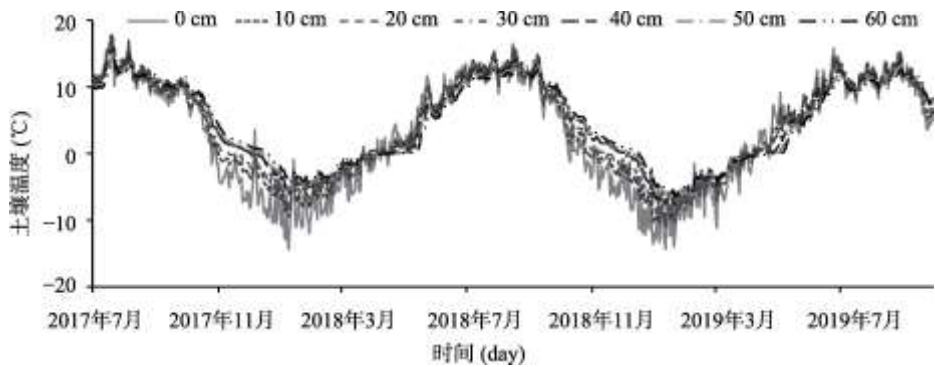


图 1 土壤温度随时间的变化趋势图

4.2 不同深度土壤温度的日变化特征

选取 2017 年至 2019 年中的 1、4、7、10 月土壤温度变化较大的月份作为代表月份（不同年的月份取平均值），研究土壤温度的日动态变化。为了消除每日天气不同造成土壤温度的剧烈变化，本文计算了一个月内每天同一时刻的土壤温度平均值。由图 2 得出，随着土层的加深，土壤温度的日变化减弱，30 cm 土层以下，温度的日变化基本保持平衡不变，

30 cm 以上土层温度日变化较为明显且趋势相同。其中,地表最先达到峰值,其次为 10 cm 土层,表现出一定的滞后性。4 个代表月份中,地表峰值均出现在 16:00,10 cm 峰值均出现在 17:00,20 cm 峰值均出现在 19:00;在 4 个代表月中,地表土壤温度峰值分别为 6.3、12.4、22.9、15.1 °C;10 cm 土壤温度峰值分别为-4.8、4.3、19.2、8.8 °C;20 cm 土壤温度峰值分别为-6.0、1.9、15.5、5.0 °C。

地表温度也最先达到谷值,趋势与峰值规律相似,随着土层的加深,谷值延后且振幅减少。4 个代表月中,4、7、10 月的地表温度谷值出现在 7:00,1 月的地表温度谷值出现在 9:00;10 cm 峰值出现时间均比 0 cm 出现时间延后 1 小时,20 cm 土层温度谷值延后 2 小时;在四个代表月中,地表温度谷值分别为-18.7、-6.9、6.1、-5.4 °C;10 cm 土壤温度谷值分别为-11.6、-1.1、9.1、0.4 °C;20 cm 土壤温度谷值分别为-9.4、0.1、10.8、2.6 °C。

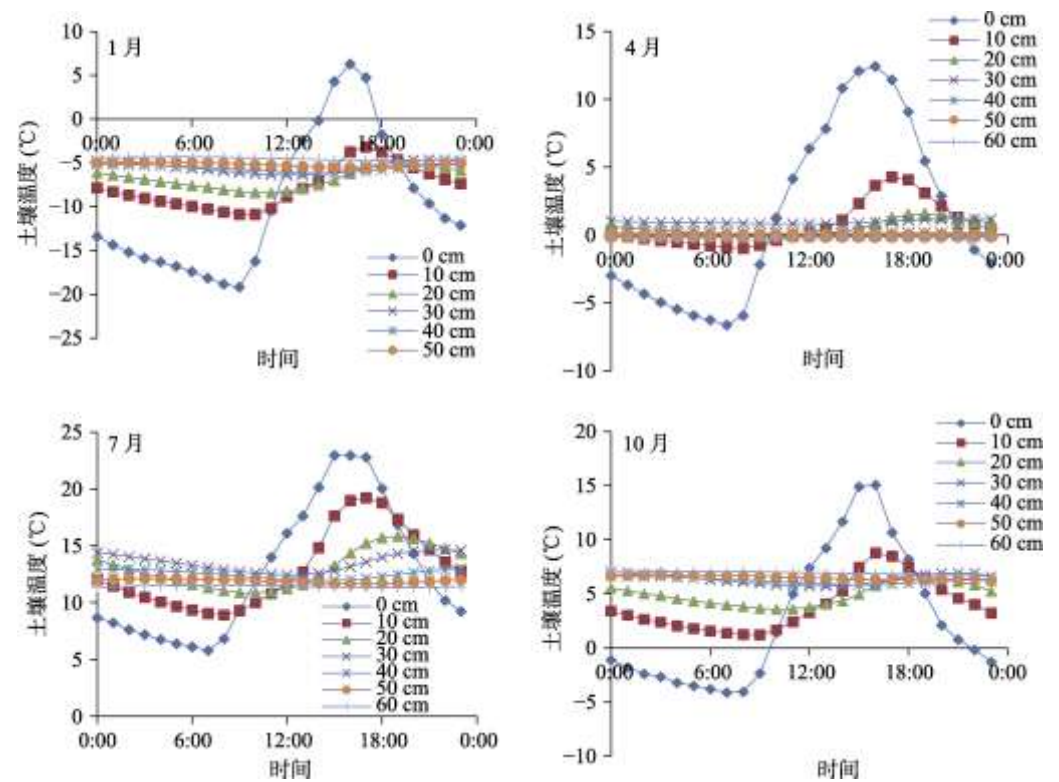


图 2 不同深度土壤温度的日变化对比图

4.3 地表温度与气象因子的关系

4.3.1 地表温度与气温

地表温度是大气和土壤相互作用的重要参数,可以表征地面热源特征。从各月平均气温的时间变化来看(图 3),二者随着时间的变化趋势一致,呈现类似正余弦变化趋势,土壤温度高于空气温度,且温差为 1.0–5.5 °C。2017 年 12 月–2018 年 9 月份,二者温度差异较大(2.5–5.5 °C),其他月份相差不大,在 2.5 °C 以内。通过拟合土壤温度和空气温度变化

曲线，得出空气温度振幅为 12.5 ℃，地表温度振幅为 10.8 ℃，空气温度变化较地表温度强烈。可能是地表致密的草盘层增大了土壤的热容量，或者地表和深层土壤温度的互相补偿，使得土壤温度变化幅度较低。

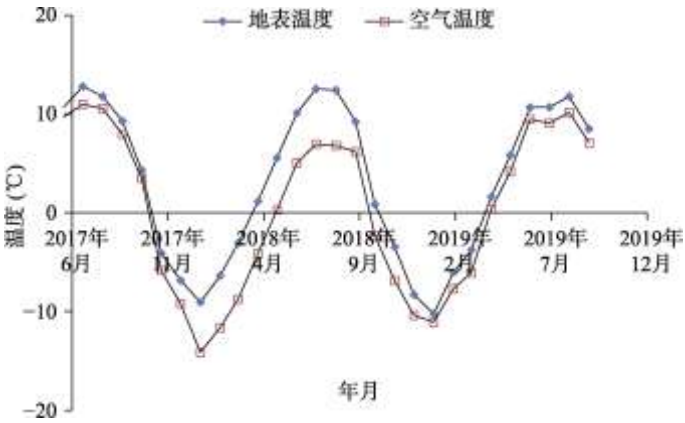


图 3 地表温度与空气温度动态图

4.3.2 地表温度与空气湿度

由图 4 得出，不同的空气湿度对应着不同的土壤温度。由于空气湿度受天气的影响较大，所以波动较为杂乱，但不难看出，空气湿度在夏季最高，可达到 80% 以上，冬季最低，为 20% 左右。但是在 2018 年冬季空气湿度较往年同期大，其原因可能是 2018 年冬季项目区进行了定期喷淋措施，使得空气湿度较大，而喷淋是为了调查项目区植被的越冬存活情况。

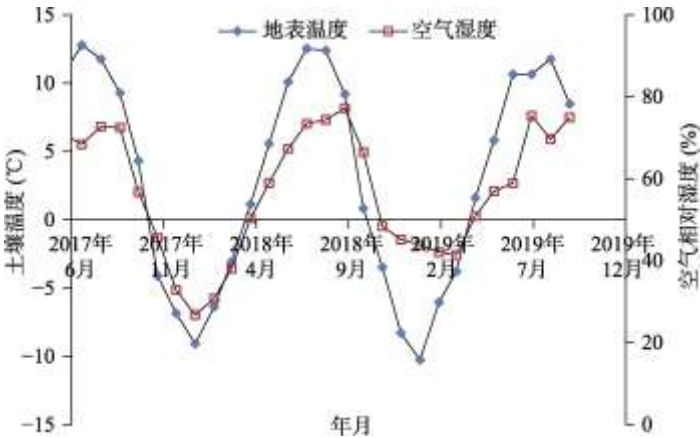


图 4 地表温度与空气湿度动态图

4.3.3 地表温度与累计太阳辐射

图 5 为地表温度和太阳辐射随时间的变化，可以看出，地表温度和太阳辐射呈现相似的变化趋势，但是地表温度的振幅变化更大；辐射总量峰谷值出现的时间点与地表温度不同步，呈现一定的超前性。这说明太阳辐射要达到一定的累计量才会引起土壤温度的变化。

4.3.4 地表温度与降雨量

由图 6 可知，降雨主要集中在 5-10 月。在此期间，月降雨量与地表温度的变化趋势

较为一致，且趋于同步。从 11 月至翌年 4 月，当地降雨量大致为 0，可以暂不考虑此时间段内二者之间的关系，考虑植物生长期降雨量与土壤温度关系更具有生物学意义。

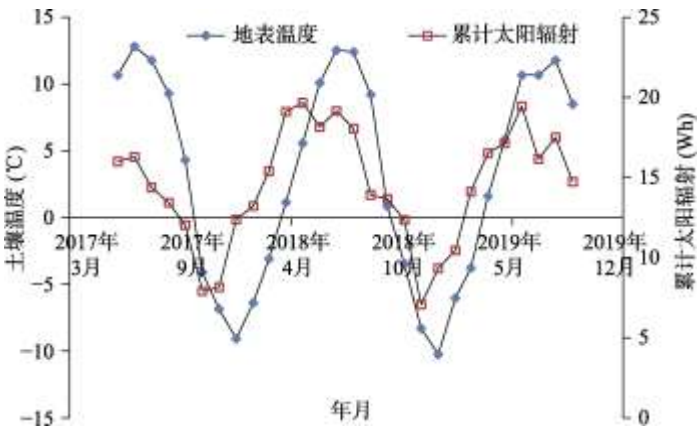


图 5 地表温度与太阳辐射动态图

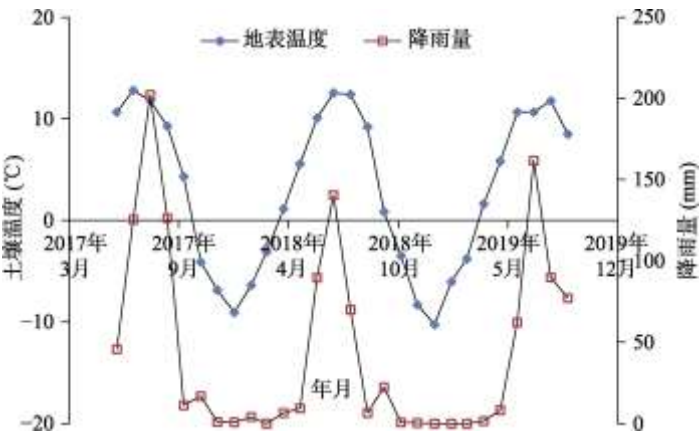


图 6 地表温度与降雨量动态图

4.3.5 地表温度与风速

风速是一个极不确定的因素，不同的季节风速差异较大。如图 7 所示，风速随时间变化变化更为杂乱，但总体上可以看出，夏季地表温度高时风速相对较小，而冬季地表温度低时风速较大。图 8 为四个季节一天内不同时刻的风速变化情况，可以看出，在 0:00–11:00 时段内四个季节的风速均表现为变化很小，在保持  $0.6\text{--}1.4\text{ m s}^{-1}$ ；在 12:00–24:00 时段内风速逐渐增大，直到 16:00 风速达到最大，之后随着时间逐渐变小；冬春季的风速峰值高出夏秋季约  $1\text{ m s}^{-1}$ ，地表温度和各个季节的风速变化趋势一致。所以，考虑一天当中的风速变化与地表温度的关系其规律性更明显，这样可以消除风速日变化的随机性。

4.3.6 地表温度与大气压

由图 9 可以得知，那曲地区气压日平均最高值为 2018 年 10 月 30 日，594 hPa，最低值为 2018 年 1 月 26 日，571 hPa。当地大气压在 571–594 hPa 之间，平均气压值为 585 hPa，为标准大气压的 58.5%，整体变化范围较小。冬季气压较低，夏季较高，与内陆地区正好



相反；大气压的变化趋势与土壤温度变化较为一致。

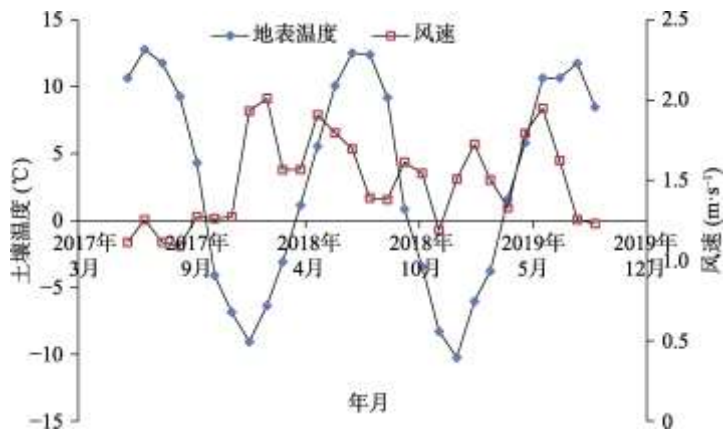


图 7 地表温度与风速动态图

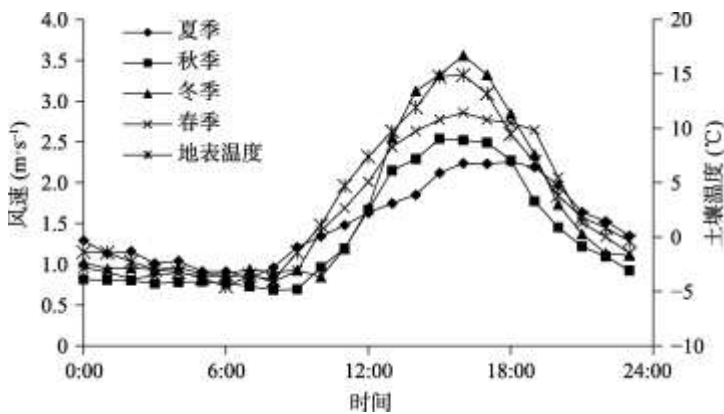


图 8 一天内风速随时间的变化图

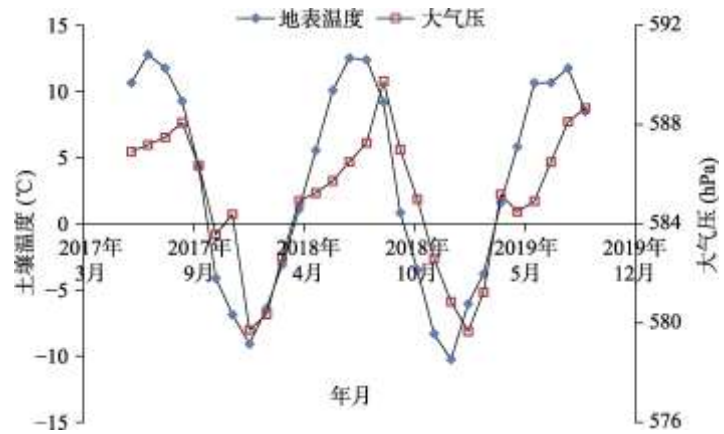


图 9 地表温度与大气压动态图

4.4 气象因素与土壤温度的相关性分析及检验

通过相关性分析得出（表 3），气温、湿度、累计太阳辐射、降雨量和大气压与地表温度



极显著相关，相关系数分别为 98%、91%、72%、75%、84%。偏相关分析是反映两个变量单独之间的线性相关程度，通过偏相关分析可知，气温、累计太阳辐射、降雨量、大气压与土壤温度显著相关，偏相关系数分别为 88%、71%、47%、42%，而风速、空气湿度与土壤温度不相关。

表 3 表层土壤温度与气象因子的相关系数统计表

气象因子	相关系数	偏相关系数
空气温度	0.98**	0.88**
空气湿度	0.91**	-0.01
累计太阳辐射	0.72**	0.71**
降雨量	0.75**	0.47**
风速	-0.21	0.30
大气压	0.84**	0.42*

注：Df=33；\*在 0.05 水平上双侧显著相关，\*\*在 0.01 水平上双侧显著相关。

5 讨论

5.1 土壤温度的变化规律

结果表明，时间尺度上高寒高海拔地区土壤温度随时间呈现类似正余弦周期性变化趋势，最大振幅为 15.7℃，与其他学者对我国其他地区土壤温度变化趋势研究结果一致<sup>[15-18]</sup>，但在震荡周期和幅度上略有差异；祁威等<sup>[19]</sup>对羌塘高原 22 个站点监测的地温日变化和月变化与本文相比，相差 1.2-1.6℃。差异原因可能是数据监测的时间尺度不同、经纬度地域或地表植被的差异<sup>[20]</sup>。在 4 个代表月份当中，地表温度表现出冬季日差值大，夏季日差值小的规律，主要原因是那曲地区夏季比冬季日照时间长，土壤接受的太阳辐射能量不一样，加上那曲土壤类型为高山草甸土，下多砾石，土壤比热容小，导致昼夜温度变化较大。空间尺度上，各层土壤平均温度表现出随着深度先升高后降低的趋势；4 个代表月份不同土层温度随深度的增加振幅减小，峰谷值变化随深度增加滞后时间变长，深度每增加 10 cm，滞后时间就多增加约 1 小时。

5.2 土壤温度与气象因素的关系

那曲地区土壤温度与空气温度关系密切，相关系数为 98%，其他学者研究的全国气温和地表温度的相关系数为 93%<sup>[21]</sup>。就气温与地温变化趋势而言，气温比地温响应强烈，波动幅度更大，这与陈超研究阿拉善地区的结果一致<sup>[22]</sup>；杨明等<sup>[23]</sup>人研究我国西部地区地温比气温变化更加强烈一些，此差异可能是高寒高海拔地区特殊气候和复杂地形，监测地区海拔、地貌不同以及监测尺度不同，但二者的相关性不受这些因素影响。因此，要得到更准确的关系，需布置更多的监测点，在不同时间尺度下进一步研究地温和气温的关系。很多研究学者们指出，气温是影响地温升高的主要原因<sup>[24-26]</sup>。气温和地温是相互影响的，热量总是自发的从温度高的一方传递到温度低的一方，所以，气温是影响土壤温度的因素的说法结论不准确<sup>[27]</sup>；不同深度的地温与气温相关性较好，随土壤深度的增加，二者相关程度更加紧密<sup>[28]</sup>。

一般情况下，降水越多，空气湿度越大。本研究中，相关分析得出降水、空气湿度与土壤温度的相关系数分别为 75%、91%，呈显著正相关关系。一些研究支持了本结果，如赵梦凡等<sup>[29]</sup>在丘陵红壤区研究中得出土壤温度与降水量在 0.01 水平上显著正相关，说明降水是影响地温的重要因子之一，只是影响大小在不同地区表现不同。但也有一些与本文不同，罗凤敏等<sup>[30]</sup>在乌兰布和沙漠研究中降水与 5 cm 地温不相关，这可能是沙漠地区昼夜气温差较大，光照强，降水量极少，从而掩盖了降水与地温的相关关系；蒙桂云等<sup>[31]</sup>研究结

果表明, 云南降水对土壤温度的影响主要表现在夏季, 呈显著的负相关, 除夏季外, 其他季节降水量与地温相关性不大。张亚峰等人<sup>[32]</sup>对干旱区优势固沙灌木柠条群落不同微生境的土壤温度进行了连续测定, 结果表明, 在降水日, 土壤温度主要受降水影响, 降水使土壤温度明显降低。由于降水是一个不稳定因素, 且本文是在全年的尺度上研究的, 避免了较短时间的研究造成的结果偏差, 其进一步的结果有待继续研究。

太阳辐射是土壤热的主要来源<sup>[26]</sup>, 直接影响着土壤温度。那曲土壤温度和太阳辐射强度的相关性为 72% ( $P < 0.01$ ); 安可栋<sup>[33]</sup>等人研究了西安旱区土气界面水热迁移转化机制及其与气象因子的关系, 通过分析模型证实了二者的正相关性; 魏胜龙等<sup>[34]</sup>在福建省进行太阳辐射模拟实验, 也得出了太阳辐射和土壤温度的显著关系, 且相关系数为 62.2%; 所以, 太阳辐射对西藏地区土壤温度变化起着重要的影响。

大气压与土壤温度的关系研究较少, 尤其在西藏那曲这种低气压、大风环境下二者的相关性大小。本研究得出, 大气压与土壤温度的相关系数为 84%, 呈现正相关关系, 主要原因是西藏地区下垫面高 (约 4,500 m), 相当于内陆地区的高空, 空气稀薄, 气压越高温度越高, 刘建强<sup>[35]</sup>等人的研究均可支撑本观点; 二者偏相关系数为 42%, 说明了在不考虑其他环境因素外, 那曲地区大气压与土壤温度也达到显著水平, 温度升高, 压强增大; 风速与土壤温度的相关性不显著, 这与赵梦凡<sup>[29]</sup>在江西省、于莉丽等<sup>[36]</sup>人在锡林浩特研究结果相反, 可能是西藏特殊环境导致的。

## 6 结论

通过对 2017 年 6 月至 2019 年 9 月监测数据进行分析, 得出以下结论:

(1) 在时间分布上, 土壤温度以类似正余弦曲线形式在  $-15 - 17.5$  °C 之间呈现周期性变化, 在 10 月会发生突变而迅速下降 13.9 °C; 土壤昼夜温度变化也呈现正余弦曲线变化, 不同土层出现峰谷值时间不同, 深度增加 10 cm, 滞后时间多增加约 1 h; 昼夜温差变化最大月份为 1 月。在空间分布上, 土壤的年平均温度和地积温随着深度的增加呈现先升高后降低的趋势, 且转折点在 30 cm; 不同土层温度随着深度增加变异系数减小。

(2) 气象因子影响地表温度的关系大小为: 空气温度 > 空气湿度 > 大气压 > 累计太阳辐射 > 降雨量 > 风速; 其中, 空气温度、降雨量、空气湿度、太阳辐射、大气压都呈现显著正相关, 风速则不相关; 与空气温度、空气湿度、累计太阳辐射、降雨量和大气压的相关系数分别为 98%、91%、72%、75% 和 84%。

**作者分工:** 杨洪波、于晓丹对土壤和气象数据进行了整理、相关分析; 杨洪波撰写了数据论文; 李慧婷和赵晋灵对数据分析验证和文章撰写进行指导; 付海美、于晓丹和徐妮对文章进行了修改。

## 参考文献

- [1] 林振耀, 吴样定. 青藏高原气候区划[J]. 地理学报, 1981, 36(1): 22-32.
- [2] 杜军, 建军, 洪健昌等. 1961-2010 年西藏季节性冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, (3): 512-521.
- [3] 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.
- [4] 赤曲. 西藏近 45 年之气候变化特征浅析[J]. 西藏科技, 2017, 286(1): 54-59.
- [5] Seifert, J. Effect of soil-temperature on nitrification rate [J]. *Rostlinna Výroba*, 1978, 24(1): 1-8.

- [6] Sierra, J. Nitrogen mineralization and nitrification in a tropical soil: effects of fluctuating temperature conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1219–1226.
- [7] Kang, S., Kim, S., Oh, S., *et al.* Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 136(1/3): 173–184.
- [8] Araghi, A., Mousavi-baygi, M., Adamowski, J. Detecting soil temperature trends in Northeast Iran from 1993 to 2016 [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 177–192.
- [9] Milcu, A., Lukac, M., Subke, J. A., *et al.* Biotic carbon feedbacks in a materially closed soil-vegetation-atmosphere system [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 281–284.
- [10] Coucheney, E., Stromgren, M., Lerch, T. Z., *et al.* Long-term fertilization of a boreal Norway spruce forest increases the temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization [J]. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(16): 5177–5188.
- [11] 许辰森, 熊德成, 邓飞等. 杉木幼苗和伴生植物细根对土壤增温的生理生态响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(4): 1232–1243.
- [12] 郑海峰. 模拟增温对高山林线土壤酶活性和微生物群落结构的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2018.
- [13] 杨洪波, 于晓丹, 付海美等. 西藏那曲市土壤温度、气象要素及其相关系数数据集 (2017–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.03.03.V1.
- [14] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [15] 杨梅学, 姚檀栋, 丁永建等. 藏北高原土壤温度的日变化[J]. *环境科学*, 1999, 20(3): 5–8.
- [16] 赵逸舟, 马耀明, 马伟强等. 藏北高原土壤温湿变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 578–583.
- [17] 赵维俊, 刘贤德, 金铭等. 祁连山林草复合流域土壤温湿度时空变化特征[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 795–802.
- [18] 李兴荣, 张小丽, 梁碧玲等. 深圳夏季多层土壤温度及其垂直结构日变化特征[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(22): 5996–6000.
- [19] 祁威, 张懿铨, 刘林山等. 羌塘高原核心区 2013–2014 年土壤温度变化特征[J]. *地理研究*, 2017, 36(11): 2075–2087.
- [20] 王青霞, 吕世华, 鲍艳等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 301–312.
- [21] 王佳琳, 潘志华, 韩国琳等. 1961–2010 年中国 0 cm 地温变化特征及其与气温变化的关系[J]. *资源科学*, 2016, 38(9): 1733–1741.
- [22] 陈超, 周广胜. 1961–2010 年阿拉善左旗气温和地温的变化特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 91–103.
- [23] 杨明, 李维亮, 刘煌. 近 50 年我国西部地区气象要素的变化特征[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 198–205.
- [24] 黄芳芳, 马伟强, 李茂善等. 藏北高原地表温度对气候变化响应的初步分析[J]. *高原气象*, 2016, 35(1): 55–63.
- [25] 张惠霞. 近 52 年卫辉浅层地温的变化特征分析[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(14): 6380–6382.
- [26] 杜军, 李春, 廖健等. 近 45 年拉萨浅层地温对气候变化的响应[J]. *气象*, 2007, 33(10): 61–67.
- [27] 柴红敏, 刘增进, 谷红梅. 太阳辐射、气温及土温的关系探讨[J]. *华北水利水电学院学报*, 2003, 24(3): 4–8.
- [28] 周斌, 陈鹏狮, 李晶等. 辽宁省春季表层地温变化特征及其与气温的关系[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(36): 275–280.
- [29] 赵梦凡, 景元书, 李健. 丘陵红壤区花生地与西瓜地土壤温度特征及气象因素影[J]. *江西农业大学学报*, 2016, 38(5): 1002–1008.
- [30] 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣等. 乌兰布和沙漠东北缘地温变化特征及其影响因子[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 1–8.
- [31] 蒙桂云, 喻彦. 1961–2005 年西双版纳浅层地温对气候变化的响应[J]. *气象科技*, 2010, 38(3): 316–320.
- [32] 张亚峰, 王新平, 虎瑞等. 荒漠灌丛微生境土壤温度的时空变异特征——灌丛与降水的影响[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 536–542.
- [33] 安可栋. 旱区土气界面水热传输机理及对包气带水热运移的影响[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [34] 魏胜龙, 陈志彪, 陈志强等. 微地形上太阳辐射模拟及地表温度关系研究[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(1): 129–135.
- [35] 刘建强, 黄金廷. 饱和-非饱和带温度动态与气象因素关系[J]. *地下水*, 2013, 35(2): 21–26.
- [36] 于莉丽, 白海云, 晨阳等. 锡林浩特地温与气象因子的关系[J]. *内蒙古科技与经济*, 2018, 3: 76–77.