



# 石家庄冻土变化特征与气候因子的关系分析

## 摘要

探讨石家庄冻土变化特征与气候因子的关系,以期作好土壤冻融预测.利用石家庄地区5个观测站1981—2010年逐日地温、降水量、蒸发量和冻土观测数据,采用线性趋势、完全相关系数和多元回归方法,分析讨论了该地区冻土变化特征与地温、降水量、蒸发量的变化关系.结果表明:石家庄地区土壤表面始冻期呈现明显推迟趋势,土壤表面解冻期呈现明显提前趋势,其中,中部地区始冻期推迟,解冻期提前趋势最为明显;11—12月平均地面最低温度与土壤表面始冻期正相关明显,2—3月平均地面最低温度与土壤表面解冻期负相关明显;秋季降水量和蒸发量对土壤表面始冻期推迟,冬季降水量和蒸发量对土壤表面解冻期提前影响较小.

## 关键词

冻土;变化特征;气候因子;关系分析

中图分类号 P642.14

文献标志码 A

收稿日期 2013-06-28

资助项目 国家自然科学基金(41225018)

作者简介

张翠华,女,硕士,工程师,主要从事气象资料分析与应用.zch7695@sina.com

张文煜(通信作者),男,教授,主要从事大气物理与大气环境研究.yuzhang@lzu.edu.cn

1 河北省石家庄市气象局,石家庄,050081

2 兰州大学 半干旱气候变化教育部重点实验室,兰州,730000

## 0 引言

冻土<sup>[1]</sup>是指含有水分的土壤因温度下降到0℃或以下时而呈冻结的状态.地球上冻土区面积约占陆地面积的50%.中国冻土可分为多年冻土和季节冻土.大量研究表明,多年冻土正在广泛退却,冻土活动层有明显增大趋势,气候变暖成为多年冻土减少、季节冻土增加的主导气候因素<sup>[2]</sup>.人为活动对冻土退化驱动作用最为明显<sup>[3]</sup>,地面温度明显升高造成冻土下界上升<sup>[4]</sup>.季节性冻土冻结一般从冬季开始,冬末春初冻结面积和深度达到最大,第二年春季结束<sup>[5]</sup>.近几十年来,受气候变暖、城市化、地形影响,季节冻土呈现始冻期推迟、解冻期提前趋势<sup>[6-7]</sup>.

近年来,低温升高<sup>[8]</sup>、暴雨<sup>[9]</sup>等极端天气呈多发、频发趋势,石家庄地处华北,为半湿润区,处于气候变化最为敏感的区域之一<sup>[10]</sup>,季节性冻土年际间变化差异明显<sup>[11]</sup>.季节性冻结和融化层较多年冻土层对气候变化更为敏感<sup>[12]</sup>,土壤冻融可以改变土壤水分状况和物理特性,可以反映过去一段时间气象条件影响的累积情况.研究石家庄季节冻土变化特征并进一步做好土壤冻融预测,可为当地农事生产管理提供科学依据.

## 1 资料及方法

石家庄西依太行山,东临华北平原,处于山区与平原的过渡地带,地形地貌复杂多样.鉴于该地区的地形地貌特点,以平山、赞皇、新乐、辛集和石家庄市5个观测站,分别代表石家庄地区的西北部山区、西南山区、东北部平原、东南部平原和中部地区,选取这5个观测站数据保存较完整的1980年12月1日—2010年12月31日逐日地温、降水量、蒸发量和冻土资料.

利用线性趋势<sup>[13]</sup>分别描述冻土、地温、降水量和蒸发量的气候变化特征,并对趋势系数(皮尔逊相关系数)进行了显著性检验.利用完全相关系数法<sup>[13]</sup>分析地温、降水量、蒸发量对冻土在年际变化特征的影响.当某气象要素随着时间发生明显变化,又与冻土相关性较强时,其与冻土的完全相关系数较大,完全相关系数 $R$ 的计算公式为 $R = r_1 \cdot r_2$ ,式中 $r_1$ 为气象要素与时间的相关系数, $r_2$ 为气象要素与冻土的相关系数.利用多元回归<sup>[13]</sup>分析冻土与气候因子的变化关系.

## 2 结果分析

### 2.1 冻土的变化特征

#### 2.1.1 冻土的年内变化特征

全区平均土壤始冻期出现在 11 月 21 日,各地始冻期出现在 10 月底到 12 月底,最早为东北部平原的 1986 年 10 月 29 日,最晚为中部地区的 2004 年 12 月 28 日.全区平均土壤解冻期出现在 3 月 7 日,各地解冻期出现在 2 月初到 4 月初,最早为中部地区的 2007 年 2 月 3 日,最晚为东北部平原和西南部山区的 1987 年 4 月 1 日.

#### 2.1.2 冻土的年际变化特征

从全区土壤始冻期、解冻期年际变化情况(图 1)看,始冻期呈现明显推迟趋势,30 a 来始冻期推迟了 15 d,推迟速率达到 0.49 d/a;就各地而言,大部分地区始冻期呈现明显推迟趋势,其中,中部地区推迟趋势最为明显,30 a 来始冻期推迟了 30 d,推迟速率达到 1.01 d/a.解冻期呈现明显提前趋势,30 a 来解冻期提前了 13 d,提前速率达到 -0.43 d/a;就各地而言,解冻期均呈现明显提前趋势,其中,中部地区提前趋势最为明显,30 a 来解冻期提前了 31 d,提前速率达到 -1.03 d/a.

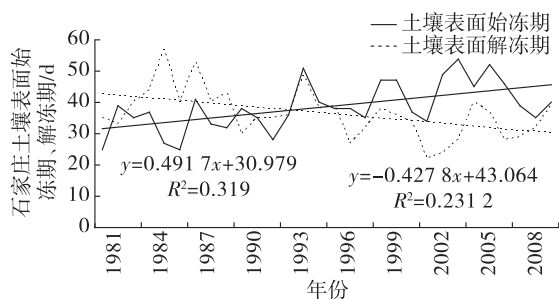


图 1 石家庄土壤表面始冻期、解冻期年际变化

Fig. 1 Interannual variation of the first freezing date and first thawing date of soil surface in Shijiazhuang

### 2.2 冻土与气候因子的相关分析

在半湿润区影响季节性冻土的因素<sup>[14]</sup>以地温和封冻前土壤水分最为明显.地温的高低直接影响土壤冻融.土壤水分的收入项是大气降水,支出项是表土蒸发<sup>[15]</sup>.土壤始冻、解冻前期和初期的降水量和蒸发量可以改变土壤湿度.由于大气降水增大土壤水分,使土壤中空气含量减小而土壤热容量、导热率增大,使地温变化幅度减小,在地温较低时利于冻土形成,从而使始冻期提前,解冻期推迟;由于表土蒸发减小土壤水分,使土壤中空气含量增大而热容量、

导热率减小,使地温变化幅度增大,在地温较低时不利于冻土形成,从而使始冻期推迟,解冻期提前.因此,下面利用地温、降水量和蒸发量变化分析与土壤表面始冻期、解冻期的变化关系.

#### 2.2.1 始冻期与地面温度、降水量和蒸发量的关系

全区各地土壤表面始冻期 30 a 来 73%~87%年份出现在 11 月,13%~27%年份出现在 12 月,极少数年份出现在 10 月;秋季降水发生在土壤表面始冻前期和初期.因此利用 11—12 月地面温度变化和秋季降水量分析与土壤表面始冻期的变化关系.

全区 11—12 月平均地面最低温度呈现明显增温趋势,而秋季降水量增加趋势缓慢,秋季蒸发量减少缓慢.由表 1 可见,土壤表面始冻期与 11—12 月平均地面最低温度正相关明显,与秋季降水量和蒸发量相关不明显,表明 11—12 月平均地面最低温度升高对始冻期推迟起明显促进作用,而秋季降水量缓慢增加,秋季蒸发量缓慢减少对始冻期推迟影响较小.

表 1 石家庄各地始冻期与地温、降水量和蒸发量的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between first freezing date and ground temperature, precipitation and evaporation in Shijiazhuang

站点	11—12 月平均地面最低温度	秋季降水量	秋季蒸发量
平山	0.45 **	0.02	-0.03
新乐	0.65 ***	-0.03	0.02
石家庄	0.46 **	0.05	0.01
赞皇	0.49 **	0.01	0.02
辛集	0.55 **	0.01	0.01
全区	0.74 ***	0.01	-0.01

注: \*\* 和 \*\*\* 分别表示通过了  $\alpha=0.01$  和  $\alpha=0.001$  的显著性检验.

#### 2.2.2 解冻期与地面温度、降水量和蒸发量的关系

全区各地土壤表面解冻期 30 a 来 50%~83%年份出现在 3 月,17%~50%年份出现在 2 月,极少数年份出现在 4 月;冬季降水发生在土壤表面解冻前期和初期.因此利用 2—3 月地面温度变化和冬季降水量分析与土壤表面解冻期的变化关系.

全区 2—3 月平均地面最低温度呈现明显增温趋势,而冬季降水量增加趋势缓慢,冬季蒸发量减少缓慢.由表 2 可见,土壤表面解冻期与 2—3 月平均地面最低温度负相关明显,与冬季降水量和蒸发量相关不明显,表明 2—3 月平均地面最低温度升高对解冻期提前起明显促进作用,而冬季降水量缓慢增加,冬季蒸发量缓慢减少对解冻期提前影响较小.

### 2.3 冻土与气候因子的变化关系

通过冻土与地温、降水量和蒸发量的相关分析

可知,11—12月平均地面最低温度与土壤表面始冻期,2—3月平均地面最低温度与土壤表面解冻期相关最为明显.以11—12月平均地面最低温度距平作为自变量,用 $D_{11-12}$ 表示,以土壤表面始冻期距平作为因变量,用 $F$ 表示,以2—3月平均地面最低温度距平作为自变量,用 $D_{2-3}$ 表示,以土壤表面解冻期距平作为因变量,用 $T$ 表示.对全区土壤表面始冻期、解冻期进行多元回归分析,得到多元回归方程( $p < 0.01$ ),如表3所示.

由表3可以看出:各地冻土与地温的变化关系不同,11—12月平均地面最低温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,土壤表面始冻期推迟 $3\sim 4\text{ d}$ ,全区平均推迟 $4\text{ d}$ ;2—3月平均地面最低温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,土壤表面解冻期提前 $2\sim$

6 d,全区平均提前 $3\text{ d}$ .

表2 石家庄各地解冻期与地温、降水量和蒸发量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between first thawing date and ground temperature, precipitation and evaporation in Shijiazhuang

站点	2—3月地面最低温度	冬季降水量	冬季蒸发量
平山	-0.46**	-0.01	0.01
新乐	-0.32*	-0.01	0.01
石家庄	-0.65***	-0.03	0.02
赞皇	-0.32*	-0.02	0.01
辛集	-0.34*	-0.01	0.01
全区	-0.62***	-0.02	0.01

注: \*、\*\*和\*\*\*分别表示通过了 $\alpha=0.10$ ,  $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.001$ 的显著性检验.

表3 石家庄各地始冻期、解冻期与气候因子的变化关系

Table 3 Variational relations between influencing climatic factors and first freezing date, first thawing date in Shijiazhuang

站点	始冻期回归方程	解冻期回归方程
平山	$F = 3.04 D_{11-12} + 0.04 (r = 0.45)$	$T = -2.71 D_{2-3} - 0.21 (r = 0.46)$
新乐	$F = 3.26 D_{11-12} + 0.09 (r = 0.65)$	$T = -1.94 D_{2-3} + 0.32 (r = 0.32)$
石家庄	$F = 4.64 D_{11-12} - 0.30 (r = 0.46)$	$T = -5.48 D_{2-3} - 0.19 (r = 0.65)$
赞皇	$F = 3.83 D_{11-12} + 0.24 (r = 0.49)$	$T = -2.60 D_{2-3} - 0.24 (r = 0.32)$
辛集	$F = 3.86 D_{11-12} + 0.36 (r = 0.55)$	$T = -1.88 D_{2-3} + 0.35 (r = 0.34)$
全区	$F = 4.19 D_{11-12} - 0.43 (r = 0.74)$	$T = -3.04 D_{2-3} + 0.34 (r = 0.62)$

### 3 结论

1) 石家庄地区土壤表面始冻期呈现明显推迟趋势,土壤表面解冻期呈现明显提前趋势,其中,中部地区始冻期推迟、解冻期提前趋势最为明显.

2) 11—12月平均地面最低温度与土壤表面始冻期正相关明显,2—3月平均地面最低温度与土壤表面解冻期负相关明显.

3) 秋季降水量和蒸发量对土壤表面始冻期推迟,冬季降水量和蒸发量对土壤表面解冻期提前影响较小.

### 参考文献

#### References

- [1] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003  
China Meteorological Administration. Ground meteorological observation specification [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003
- [2] 张国胜,李林,汪青春,等.青海高原冻土退化驱动因素的定量辨识[J].地理科学,2007,27(3):337-341  
ZHANG Guosheng, LI Lin, WANG Qingchun, et al. Quantitative identification of driving factor of frozen

- ground degeneration in Qinghai Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 37-41
- [3] 金会军,王绍令,吕兰芝,等.兴安岭多年冻土退化特征[J].地理科学,2009,29(2):223-228  
JIN Huijun, WANG Shaoling, LÜ Lanzhi, et al. Features of permafrost degradation in Hinggan Mountains, northeastern China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(2): 223-228
- [4] 李林,朱西德,汪青春,等.青海高原冻土退化的若干事实揭示[J].冰川冻土,2005,27(3):320-328  
LI Lin, ZHU Xide, WANG Qingchun, et al. Mapping and analyses of permafrost change in the Qinghai Plateau using GIS [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 320-328
- [5] 陈博,李建平.近50年来中国季节性冻土与短时冻土的时空变化特征[J].大气科学,2008,32(3):432-443  
CHEN Bo, LI Jianping. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in China in recent 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(3): 432-443
- [6] 蒲金涌,王位泰,姚小英,等.甘肃陇东地区季节冻土变化对气候变暖的响应[J].生态学杂志,2008,27(9):1562-1566  
PU Jinyong, WANG Weitai, YAO Xiaoying, et al. Effects of climate warming on seasonal frozen soil in east Gansu [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(9): 1562-1566

- [ 7 ] 李林,王振宇,汪青春,等.青海季节冻土退化的成因及其对气候变化的响应[J].地理研究,2008,27(1):162-170  
LI Lin, WANG Zhenyu, WANG Qingchun, et al. Cause of seasonal tiale degeneration and its response to climate change in Qinghai[J]. Geographical Research, 2008, 27(1):162-170
- [ 8 ] 付冬雪,孙照渤,李忠贤,等.1955—2006冬半年中国极端低温的时空变化特征[J].气象科学,2011,31(3):274-281  
FU Dongxue, SUN Zhaobo, LI Zhongxian, et al. Spatial and temporal features of China extreme minimum temperature in winter half year during 1955—2006 [ J ]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31(3):274-281
- [ 9 ] 卞韬,王丽荣,李国翠,等.石家庄暴雨的气候特征和变化规律[J].干旱气象,2009,27(1):18-22  
BIAN Tao, WANG Lirong, LI Guocui, et al. Climatic characteristics and change rule of rainstorm in Shijiazhuang of Hebei province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(1):18-22
- [ 10 ] 郭志梅,缪启龙,李雄.中国北方地区近50年来气温变化特征的研究[J].地理科学,2005,25(4):448-454  
GUO Zhimei, MIAO Qilong, LI Xiong. Variation characteristics of temperature over northern China in recent 50 years [ J ]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4):448-454
- [ 11 ] 李元华,安月改,田国强.河北省冻土气候变化初探[J].山东农业大学学报:自然科学版,2005,36(3):445-449  
LI Yuanhua, AN Yuegai, TIAN Guoqiang. Study on climatic change of frozen soil in Hebei [ J ]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2005, 36(3):445-449
- [ 12 ] 王澄海,董文杰,韦志刚.青藏高原季节性冻土年际变化的异常特征[J].地理学报,2001,56(5):523-531  
WANG Chenghai, DONG Wenjie, WEI Zhigang. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai-Tibet Plateau [ J ]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(5):523-531
- [ 13 ] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社,2007  
WEI Fengying. Modern climatic statistic diagnosis and prediction technology [ M ]. Beijing: China Meteorological Press, 2007
- [ 14 ] 杨小利,王劲松.西北地区季节性最大冻土深度的分布和变化特征[J].土壤通报,2008,39(2):238-243  
YANG Xiaoli, WANG Jingsong. The change characteristics of maximum frozen soil depth of seasonal frozen soil in northwest China [ J ]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2):238-243
- [ 15 ] 王连喜,毛留喜,李琪,等.生态气象学导论[M].北京:气象出版社,2010  
WANG Lianxi, MAO Liuxi, LI Qi, et al. Introduction to ecological meteorology [ M ]. Beijing: China Meteorological Press, 2010

## Relational analysis between variation characteristics of frozen soil and influencing climatic factors in Shijiazhuang

ZHANG Cuihua<sup>1</sup> ZHANG Wenyu<sup>2</sup> ZHANG Bingxiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shijiazhuang Meteorological Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050081

<sup>2</sup> Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000

**Abstract** Relationship between variation characteristics of frozen soil and the influencing climatic factors were analyzed for the prediction of soil freezing and thawing in Shijiazhuang. Based on the daily observation data of ground temperature, precipitation, evaporation capacity and frozen soil archived by 5 stations in Shijiazhuang from 1981 to 2010 and methods such as linear trend, multiple regression and complete correlation coefficient, variation relation between characteristics of frozen soil and the influencing climatic factors was analyzed. The results show that, the first freezing date of surface soil had a significant deterring trend while the first thawing date of surface soil had a significant advancing trend with the middle area having the most significant trend. An obvious positive correlation existed between the average lowest ground temperature during November to December, and the first freezing date of soil surface, while an obvious negative correlation between the average lowest ground temperature during February to March and the first thawing date of soil surface. Precipitation and evaporation capacity in autumn had weak effect on deterring the first freezing date of soil surface, so is the precipitation and evaporation capacity in winter effect on advancing the first thawing date of soil surface.

**Key words** frozen soil; variation characteristics; climatic factors; relation analysis