

引用格式:Jin Rui.Long-term Land Surface Freeze/thaw Status Datasets of China[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(4):820-826.[晋锐.中国长时间序列地表冻融状态数据集[J].遥感技术与应用,2016,31(4):820-826.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.4.0820

中国长时间序列地表冻融状态数据集

晋 锐

(中国科学院西北生态环境资源研究院 黑河遥感试验研究站,甘肃省遥感重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:地表冻结和融化状态的转换表征着陆地表层过程的休眠和活跃,亦可作为水文循环和生态系统活动的“开关”。本文主要介绍根据双指标冻融状态分类算法和决策树算法制备的中国区域长时间序列地表冻融数据集(分别为 1978~2015 年与 1987~2009 年),该数据集可用于分析中国区域地表冻融循环的开始/结束日期、冻结期、冻结天数、冻结范围等指标的时空分布和变化趋势,可为中国区域的冰冻圈和水文相关研究,以及气候变化分析提供重要的数据支持。
关 键 词:数据论文;地表冻融状态;微波遥感;长时间序列
中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)04-0820-07

1 引 言

北半球约有 55% 的陆地表面每年都会历经冻融状态循环过程^[1],对地气间能水交换、水文循环及碳循环产生广泛而深远的影响。地表冻融状态强烈影响着边界层能量交换的季节波动和重新分配,从而影响大气廓线的发展和区域天气模式^[2]。地表冻结和融化状态的转换表征着陆地表层过程的休眠和活跃,亦可作为水文循环和生态系统活动的“开关”^[3]。

地表冻融循环还强烈影响着生态系统功能。土壤融化期决定着植被生长季,而春季土壤融化开始日期和生长季持续时间的年际变化直接影响陆地净初级生产力和净生态系统碳交换量的年总量变化及其空间分布格局^[4],以及大气 CO₂ 碳源碳汇^[5]。研究表明,全球气候变暖促使地表冻融循环的频率增加,植被生长季延长^[6];而主要温室气体 N₂O 排放的剧烈增加,主要源于农田,且最大排放量集中于春季地表融化期^[7]。

地表冻融状态,决定着地表径流和土壤中下渗

的水量分配。积雪消融的开始时间能够间接用于确定冬季末期的最大雪水当量及其发生日期,对于业务化的径流预报非常重要;而估计土壤中的相变水含量,确定土壤冻结强度,对于防控和预报土壤侵蚀灾害至关重要。

地表冻融状态的分布范围、开始/结束日期、持续时间及实际冻/融天数在年、季节、甚至日尺度上都有较大的时空变异性^[1]。遥感技术为实时监测全球及区域尺度地表冻融状态及其时空动态,提供了高效且准确的技术手段。全球综合观测计划(Integrated Global Observing Strategy,IGOS)也单独列出了冰冻圈主题,其目标之一即融合多源观测,建立综合、协调和集成的冰冻圈观测系统。其中,多年冻土/季节冻土及其活动层的热状态遥感监测列为其重要方向之一(<http://igos-cryosphere.org>)。

长时间序列的地表冻融状态遥感产品目前已公开发布,并被初步应用于气候变化和植被动态相关研究,例如全球逐日地表冻融状态数据集^[8],由 SSM/I 37GHz 垂直极化亮温时间序列,根据季节阈值分类算法生成,时间跨度为 1988~2007 年。本数

收稿日期:2016-05-20;修订日期:2016-07-26
基金项目:国家自然科学基金项目(41471357、41071226),甘肃省自然科学基金(1501RJZA013)。
作者简介:晋 锐(1979—),女,山西临汾人,副研究员,主要从事冰冻圈遥感与遥感观测系统应用研究。E-mail:jinrui@lzb.ac.cn。

据集特色在于,通过土地覆盖、DEM、逐日气温等辅助数据定义了全球范围内植被生物物理特性受低温限制和冻融循环影响的区域,从而进行地表冻融状态分类,尤其适用于地表冻融循环和碳循环相互作用研究。

本文主要介绍根据双指标冻融状态分类算法和决策树算法制备的中国区域长时间序列地表冻融数据集,主要由 SMMR、SSM/I 和 SSMIS 的多通道亮温,通过双指标冻融状态分类算法^[9]和决策树算法^[10]获取。两种算法制备的数据集时间跨度分别为 1978~2015 年和 1987~2009 年。双指标算法的特点是针对不同地表类型和高程带分别进行了算法的阈值标定,且可综合利用 SMMR、SSM/I 和 SSMIS 30 余年的亮温数据积累;而决策树算法的特点是引入 22 和 85 GHz 亮温观测,剔除沙漠、降水等散射体对地表冻融分类的影响。该数据集可用于分析中国区域地表冻融循环开始/结束日期、冻结期、冻结天数、冻结范围等指标的时空分布和变化趋势,可为中国区域的冰冻圈和水文相关研究,以及气候变化分析提供重要的数据支持。

2 源数据与算法

2.1 数据

中国长时间序列地表冻融数据集主要是由 SMMR、SSM/I 和 SSMIS 被动微波辐射计观测到的亮度温度制备而来。微波受大气影响相对较小,可全天候全天时工作;而且波长较长,对地表具有一定穿透深度,可获得地下一定深度范围内的信息,为我们提供了完全不同于可见近红外和热红外波段的视角来俯视地球。

逐日被动微波亮温数据由美国国家雪冰数据中心(NSIDC)免费提供,包括 Nimbus-7 SMMR Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures (<http://nsidc.org/data/nsidc-0071.html>)和 DMSP SSM/I-SSMIS Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures (<http://nsidc.org/data/NSIDC-0032>)。其中 SMMR 亮温从 1978~1987 年,SSM/I 数据从 1987~2009 年,SSMIS 数据从 2009~2015 年。SMMR、SSM/I 和 SSMIS 的卫星平台和传感器主要参数请见表 1。

表 1 被动微波传感器主要参数

Table 1 Passive microwave remote sensors and their parameters

传感器	SMMR		SSM/I		SSMIS
平台	NIMBUS-7	DMSP-F08	DMSP-F11	DMSP-F13	DMSP-F17
运行时期	1978.10.26~	1987.9.7~	1991.12.3~	1995.5.3~	2006.12.14~
	1987.8.20	1991.12.30	1995.9.30	2009.4.29	
通道/GHz	6.6,10.7,	19.35,22.24,	19.35,22.24,	19.35,22.24,	19.35,22.24,
	18.0,37.0	37.05,85.50	37.05,85.50	37.05,85.50	37.05,91.66
极化方式	V,H	V,H	V,H	V,H	V,H
空间分辨率/km	25×25	12.5×12.5~25×25	12.5×12.5~25×25	12.5×12.5~25×25	12.5×12.5~25×25
入射角/°	50.2	53.1	53.1	53.1	53.1
重访周期/d	2	1	1	1	1
扫描宽度/km	780	1 400	1 400	1 400	1 400
过赤道的时间 (UTC)	12:00 (A)	6:20 (A)	17:17 (A)	17:58 (A)	17:31 (A)
	24:00 (D)	18:20 (D)	5:17 (D)	5:58 (D)	5:31 (D)

2.2 算法

介电常数的变化会直接影响土壤的微波发射和散射特征。从辐射特征来看,由于被动微波辐射计获得的亮温 T_B ,是可感深度范围内有效土壤温度 T_{eff} 和发射率 e 的函数,因此冻土的亮度温度通常都低于融土。当融土相变为冻土时,其介电常数减小,发射率增大,而土壤温度降低和发射率升高两个相反的作用相互交织在一起,使得在同样降温条件下,对于含水量很少的干土,冻结时由于发射率无明显

变化,亮温降低;而对于含水量较多的湿润土壤,发射率则呈现明显跃增,当 T_{eff} 略低于冻结点时, T_B 有可能增加。因此冻土虽然具有较低的亮温,但不能作为判别的唯一明确指标。从散射特征分析,在降温过程中,土壤中液态水含量减少,相对微波呈视在干燥,土壤介电常数显著减小,且虚部比实部和折射率 n 下降幅度更大,因此损耗正切降低;而有效发射深度 Z_e 与 ϵ''/n 成正比, Z_e 增大使热发射可来自发射介质的更深处,给光子的体散射创造了更多机

会;且频率越高,土体呈现的不均匀性越大,体散射越强。

综上所述,冻土具有显著区别于融土的微波辐射和散射特性:①物理温度和亮度温度均较低;②发射率较高;③体散射较强,即亮度温度随着频率增大而减小。因此可根据以上特征选取相应指标区分地表冻融状态。

2.2.1 决策树算法

决策树算法建立在各类型目标样本的统计特征和先验信息及理论模型计算基础之上,即通过分析各类地物不同频率、不同极化亮温的组合方式所表现出的分布特征,确定决策树各结点判别条件以实现最终分类;同时考虑排除沙漠、积雪和降水等散射体的干扰^[10]。

根据各地表类型的样本及其亮温特征,确定决策树各结点阈值:①沙漠的 PD 为 $36.28 \pm 2 \times 2.22$

(标准差),明显高于其他三种类型,可用指标 $PD > 30$ 首先识别出大部分沙漠;漏分的沙漠将在决策树的两个次一级分支中用 $PD > 25$ 的指标予以剔除;②冻土和积雪均为强散射体,两者 SI 值较高,而融土的体散射很弱,SI 为 $4.76 \pm 2 \times 5.51$,可用 $SI \geq 10$ 将大部份强散射体和非散射体区分开;③从 37 GHz 垂直极化亮温来看,冻土为 $232.57 \pm 2 \times 9.40$,而融土为 $259.1 \pm 2 \times 5.33$,结合时间序列分析中 4 cm 地温 < 273 K 时对应的 $T_{B_{37V}}$ 约为 252 K,可采用 $T_{B_{37V}} \leq 252$ 区分出冻结土壤(图 4d);④对于降水,采用 Grody 提出的指标 $165 + 0.49 \times T_{B_{85V}} \leq T_{B_{22V}}$ 剔除含有冰晶,散射作用较强的深对流雨,和指标 $254 \leq T_{B_{22V}} \leq 258$ and $SI \leq 2$ 剔除一般性降水事件^[11],另外附加了 $T_{B_{85V}}/T_{B_{19V}} < 0.9$ 的指标用于识别出冰雹云和暴雨。最终建立如图 1 所示的决策树。

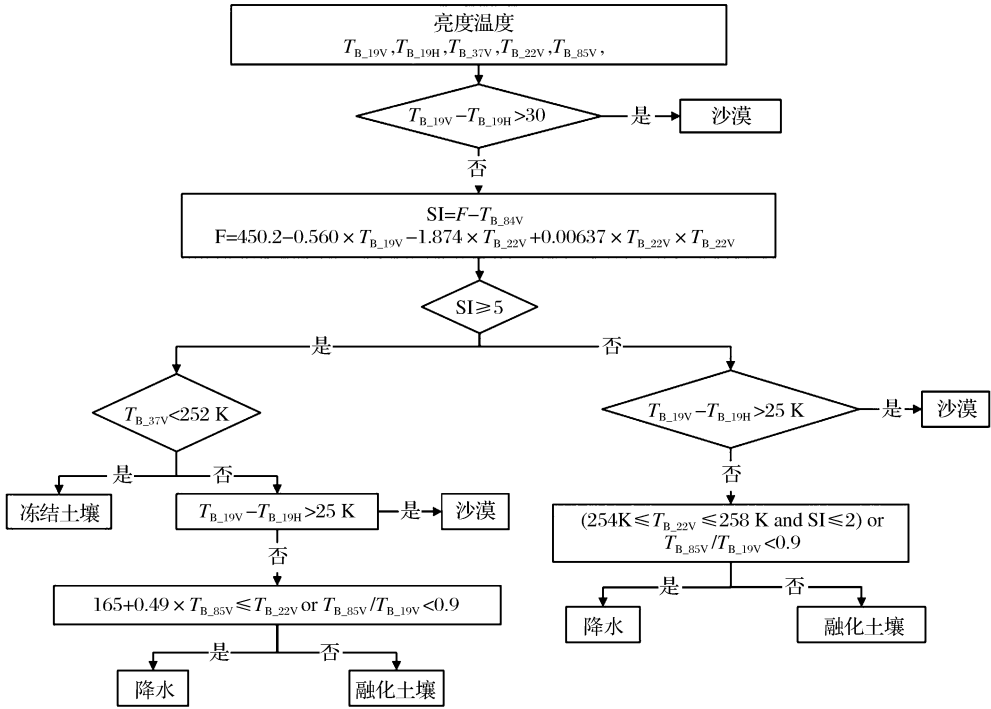


图 1 决策树算法流程图

Fig.1 Flow chart of decision tree algorithm for soil freeze/thaw classification

2.2.2 双指标算法

被动微波遥感数据从 1978 年 SMMR 发射升空后,包括后续 1987 年接替 SMMR 运行的 SSM/I 和 2006 年开始运行的 SSMIS,至今已有长达 30 余年的逐日亮温时间序列,这对于分析研究地表过程的变化趋势意义非凡,尤其是地表过程与气候变化的相互作用和反馈。

为充分利用被动微波遥感亮温的长时间序列优

势,我们采用双指标算法,即 37 GHz 亮度温度以及 37 GHz 与 18/19 GHz 间的负亮温谱梯度,来进行地表冻融状态分类。选择 37 GHz 亮度温度是因为它与地表温度和气温有很好的相关性,而且这一波段发射率不像低频那样对土壤湿度敏感。冻土呈现负亮温谱梯度是因为对于地表散射体来说,在微波高频由体散射引起的衰减比低频强,导致高频亮温低于低频亮温。

本数据集在传统双指标算法基础上,采用中国气象局气象台站的日最低温度对不同地表类型分别进行了 $T_{b.37V}$ 的阈值标定(表 2),SG 仍然采用 $SG<0$ 作为阈值,包括水浇地、旱地、有林地、疏林地、灌木林、高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地、高覆盖草地($h>3\ 500\ m$)、中覆盖草地($h>3\ 500\ m$)、低覆盖草地($h>3\ 500\ m$)及未利用地^[9]。

表 2 双指标分类算法阈值

Table 2 Thresholds of $T_{b.37V}$ in the dual-indices classification algorithm		
地表类型	SMMR- $T_{b.37V}/K$	SSM/I- $T_{b.37V}/K$
水浇地	258.39	260.47
旱地	259.5	262.82
有林地	260.42	262.24
疏林地	258.16	261.16
灌木林	258.57	260.53
高覆盖草地	250.51	260.94
中覆盖草地	258.38	260.07
低覆盖草地	257.95	259.54
高原高覆盖草地	258.74	260.24
高原中覆盖草地	254.72	255.51
高原低覆盖草地	252.49	254.9
未利用地	251.91	254.57

3 数据组织

数据集按年份建立对应文件夹存放,地表冻融分类结果以日为单元进行文件存储,数据覆盖范围为整个中国陆地($60^{\circ}\sim140^{\circ}E$; $15^{\circ}\sim55^{\circ}N$)。数据文件类型为 ASCII GRID,其头信息(其中 xllcenter, yllcenter 和 cellsize 单位为 m)如下:

```
ncols 308
nrows 166
xllcorner 5778060
yllcorner 1880060
cellsize 25067.525
nodata_value 0

该数据集的投影方式为全球 EASE-Grid 投影,即等积割圆柱投影,双标准纬线为南北纬  $30^{\circ}$ 。其投影参数详见 http://nsidc.org/data/ease/ease\_grid.html。如果需要将 EASE-Grid 投影方式转换成 Geographic 投影方式,请参照以下内容:
```

```
Input
Projection Cylindrical
Units meters
```

```
Parameters
1 / * Enter projection type (1,2,or 3)
00 00 00 / * Longitude of central meridian
30 00 00 / * Latitude of standard parallel

Output
Projection Geographic
Spheroid Krasovsky
Units dd

Parameters
End
```

本数据集的分类代码见表 3,制备的中国长时间序列地表冻融状态数据集的示意图见图 2 和图 3。

4 数据质量验证

4.1 决策树算法的数据质量验证

利用国际协同加强观测期(CEOP)在青藏高原的土壤温度和湿度观测系统获取的 $4\ cm$ 土壤温度数据代表浅层土壤真实冻融状态验证分类结果,其准确性达 87% 。经过分析,约 40% 和 73% 的误分分别发生在浅层土壤温度为 $-0.5\sim0.5\ ^{\circ}C$ 和 $-2.0\sim2.0\ ^{\circ}C$ 之间,即冻结点附近;且多发生在冷暖季节过渡时期,即 $4\sim5$ 月和 $9\sim10$ 月,分别占误分的 33% 和 38% 。基于该决策树获得 2002 年 10 月~2003 年 9 月中国全境地表冻结日数图,以中国冻土区划及类型图作为参考进行精度评价,其总体分类精度为 91.66% ,Kappa 系数为 80.5% ,且冻融界线与季节冻土分布南界具有较好的一致性。

4.2 双指标算法的数据质量验证

验证双指标算法时,我们采用了以下指标^[12]:

冻结状态分类精度 = $F_{\checkmark}/(F_{\checkmark}+T_{\times})$

融化状态分类精度 = $T_{\checkmark}/(T_{\checkmark}+F_{\times})$

总体分类精度 = $(F_{\checkmark}+T_{\checkmark})/(F_{\checkmark}+F_{\times}+T_{\checkmark}+T_{\times})$

其中, F_{\checkmark} 为冻结状态准确分类统计数, F_{\times} 为融化状态错误分类统计数, T_{\checkmark} 为融化状态准确分类统计数, T_{\times} 为冻结状态错误分类统计数。

表 3 中国长时间序列地表冻融状态数据集的分类代码

Table 3 Classification coding of dataset about surface freeze/thaw status over China		
编码	决策树算法	双指标算法
1	冻结地表 Frozen surface	冻结地表 Frozen surface
2	融化地表 Thawed surface	融化地表 Thawed surface
3	沙漠 Desert	沙漠 Desert
4	降水 Precipitation	水体 Water body

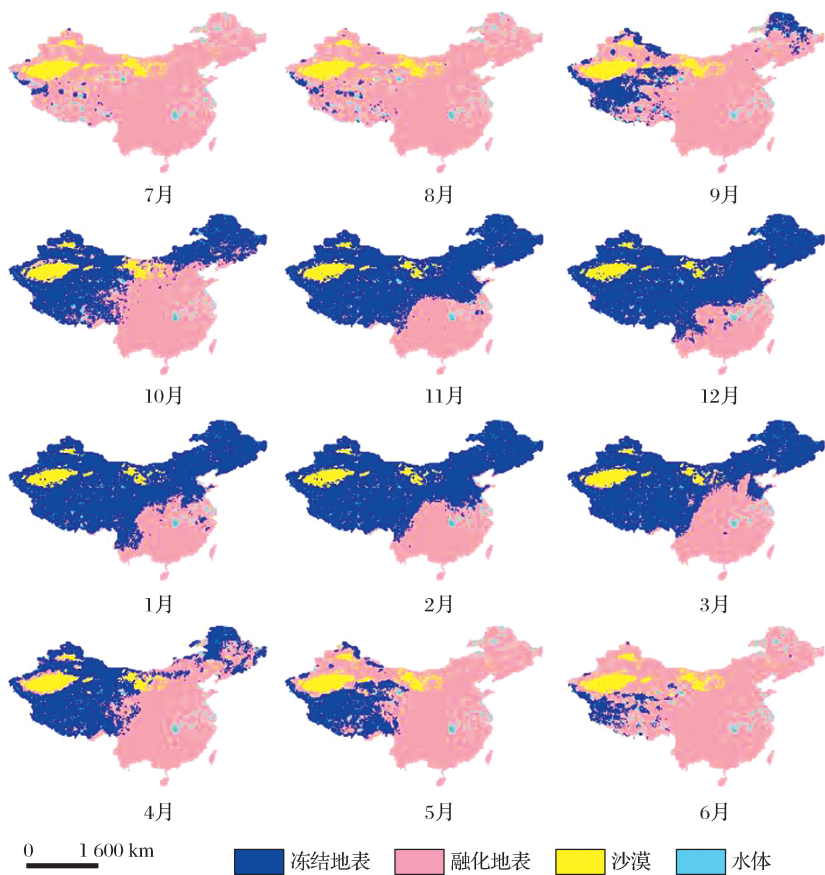


图 2 中国逐月地表冻融状态范围(1978~2015,双指标算法)

Fig.2 Monthly distribution of surface freeze/thaw status over china during 1978 and 2015 based on dual-indices algorithm

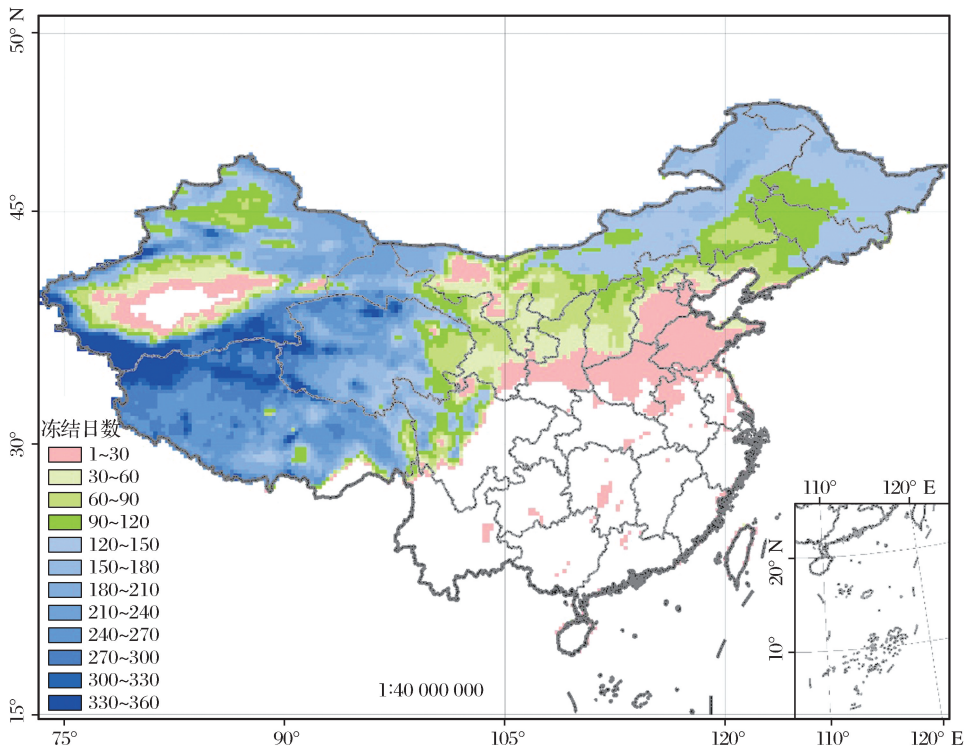


图 3 基于决策树算法的中国地表冻结天数图(2002 年 10 月 1 日~2003 年 9 月 31 日)

Fig.3 Number of frozen days in china (Oct.1,2002~Sep.31,2003) based on decision tree algorithm

地面验证数据采用了 273 个中国气象局站点的 1978 年 10 月 31 日至 2006 年 12 月 31 日的日最低地表温度观测。结果表明,SMMR 和 SSM/I 的冻

结状态分类精度分别为 88.3%和 84.0%,融化状态分类精度可达 86.2%和 92.4%;两者的总体分类精度则为 87.4%和 88.7%(表 4)。

表 4 双指标算法的分类精度
Table 4 Classification accuracy of dual-indices algorithm

地表类型	验证站点数量	SMMR 分类精度/%			SSM/I 分类精度/%		
		冻结	融化	总体	冻结	融化	总体
水浇地	5	82.3	90.8	89.3	80.2	95.9	89.8
旱地	106	90.9	86.9	88.7	84.4	94.0	90.5
有林地	28	88.8	81.9	85.5	85.5	87.0	86.8
灌木林	7	91.6	83.2	87.3	85.5	90.6	88.5
疏林地	11	91.3	86.7	89.1	81.6	89.4	88.4
高覆盖草地	38	85.7	87.1	87.1	80.6	93.9	86.1
中覆盖草地	42	84.7	88.5	86.6	83.7	93.4	88.2
低覆盖草地	16	89.7	84.5	87.4	87.5	91.3	89.6
未利用地	20	83.4	82.9	83.6	85.3	88.4	87.4
总体	273	88.3	86.2	87.4	84.0	92.4	88.7

5 数据获取与使用说明

本数据集可通过中国寒区旱区科学数据中心下载,地址分别为 <http://westdc.westgis.ac.cn/data/76bce7bb-e1b2-49c4-9537-668a6bac42a> (双指标算法)和 <http://westdc.westgis.ac.cn/data/c5f2a6bd-f481-4390-851f-3519d6eb7fdd>(决策树算法)。在使用时参考并引用本论文。数据下载后可用 ArcGIS 或 ENVI 软件直接读取;该数据可应用于中国区域的冰冻圈和水文相关研究和气候变化分析。

致谢:该数据的生产得到国家自然科学基金项目(41471357,41071226)和甘肃省自然科学基金(编号:1501RJZA013)资助!

版权声明:数据版权归数据作者及所在单位所有,但不存在利益冲突。

参考文献 (References):

[1] Zhang T,Armstrong R L,Smith J.Investigation of the Near-surface Soil Freeze-thaw Cycle in the Contiguous United States:Algorithm Development and Validation[J].Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (D22), doi: 10. 1029/2003JD003530.

[2] Betts A K,Viterbo P,Beljaars A C M,*et al*.Impact of BORE-AS on the ECMWF Forecast Model[J].Journal of Geophysical Research,2000,106(D24):33,593-33,604.

[3] McDonald K C,Kimball J S.Hydrological Application of Remote Sensing:Freeze-thaw States Using Both Active and Passive Microwave Sensors[C]//Encyclopedia of Hydrological Sciences.Part 5.Remote Sensing.M.G.Anderson and J.J.McDonnell (Eds.), John Wiley and Sons Ltd,2005,Doi:10.1002/0470848944.hsa059a.

[4] Vaganov E A,Hughes M K,Kirdyanov A V,*et al*.Influence of Snowfall and Melt Timing on Tree Growth in Subarctic Eurasia[J].Nature,1999,400:149-151.

[5] Frolking S,Goulden M L,Wofsy S C,*et al*.Modelling Temporal Variability in the Carbon Balance of a Spruce/Moss Boreal Forest[J].Global Change Biology,1996,2:343-366.

[6] Henry H A L.Climate Change and Soil Freezing Dynamics: Historical Trends and Projected Changes [J]. Climatic Change,2008,87:421-434.

[7] Matzner E,Borken W.Do Freeze-thaw Events Enhance C and N Losses from Soils of Different Ecosystems? A Review[J]. European Journal of Soil Science,2008,59:274-284.

[8] Kim Y,Kimball J S,McDonald K C,*et al*.Developing a Global Data Record of Daily Landscape Freeze/Thaw Status Using Satellite Passive Microwave Remote Sensing[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2011,49(3):949-960.

[9] JinR,Zhang T J,Li X,*et al*.Mapping Surface Soil Freeze-thaw Cycles in China based on SMMR and SSM/I Brightness Temperatures during 1978-2008[J].Arctic,Antarctic,and Alpine Research,2015,47(2):213-229.

[10] Jin R,Li X,Che T.A Decision Tree Algorithm for Surface Soil Freeze/Thaw Classification over China Using SSM/I Brightness Temperature[J].Remote Sensing of Environment,2009,

113(12):2651-2660,doi:10.1016/j.rse.2009.08.003.

[11] Grody N C. Classifiaction of Snow Cover and Precipitation Using the Special Sensor Microwave Imager[J]. Journal of Geophysical Research,1991,96(D4):7423-7435.

[12] Zhang T, Armstrong. R L. Soil Freeze/Thaw Cycles over Snow-free Land Detected by Passive Microwave Remote Sensing[J]. Geophysical Research Letters,2001,28(5):763-766.

Long-term Land Surface Freeze/thaw Status Datasets of China

Jin Rui

(Northwest Institute of Eco-Environment and Resources ,
Chinese Academy of Sciences ,Lanzhou 730000 ,China)

Abstract: The transitions of land surface freeze/thaw status indicate the dormancy and activeness of land surface processes,like a switch controlling hydrological cycle and ecosystem activity.This paper introduced two datasets of long-term land surface soil freeze/thaw states of China based on dual-indices algorithm and decision tree algorithm Covering the period from 1978 to 2015 and from 1987 ~ 2009 respectively. Both datasets can be used to derive the distribution and trend of onset of surface freeze/thaw status,frozen period,the number of frozen days and frozen extent over China,the information is useful to support cryosphere and hydrology related research,and climate change analysis.Both datasets can be accessed forfree in Environmental and Ecological Science Data in West China (<http://westdc.westgis.ac.cn>).

Key words: Data paper; Surface freeze/thaw status; Passive microwave remote sensing; China; Long-term datasets