

1951年以来中国无霜期的变化趋势

宁晓菊, 张丽君, 杨群涛, 秦耀辰

(河南大学黄河文明传承与建设河南省协同创新中心/环境与规划学院/黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004)

摘要: 准确界定无霜期及初、终霜日的时空变化是减少气候变化对农业生产的危害、有效提升农业适应性的重要内容。根据1951年以来国内824个气象站点日最低气温资料, 分析初、终霜日和无霜期在全国的分布特征, 采用累积距平和线性倾向估计模拟三者的变化趋势, 并对无霜期进行突变检验。结果显示: ① 中国无霜期随纬度增加或海拔升高而减少, 无霜期的年际波动幅度随纬度增加或随海拔降低而减少。② 中国80%以上区域呈现初霜日推后、终霜日提前和无霜期延长的趋势, 且三者的变化幅度均是北方大于南方、东部大于西部。③ 中国多数农区无霜期延长是初霜日推后和终霜日提前共同影响, 而西南区和长江中下游区部分地区无霜期延长是初霜日的推后幅度大于终霜日的推后幅度或终霜日的提前幅度大于初霜日的提前幅度。④ 中国过半区域无霜期在1980s和1990s发生突变。突变集中分布在东北区中西部、内蒙及长城沿线区、黄淮海区、青藏区和甘新区; 突变时间上, 东部农区和西部农区无霜期分别在1980s和1990s突变。

关键词: 无霜期; 初霜日; 终霜日; 变化趋势; 空间分布; 农区

DOI: 10.11821/dlxb201511010

1 引言

全球气候变暖导致农作物面临的热胁迫增加, 影响作物产量^[1-3]。作为衡量温度变化的重要指标, 无霜期及初、终霜日成为气候变化下农业适应性研究关注的重点之一, 分析其时空变化趋势有利于减少极端低温对农业生产带来的危害, 因时因地制宜地选择作物种类与品种、调整种植制度等。目前已有较多研究在初、终霜日出现早晚和无霜期长短等方面取得重要进展。

在初霜日出现早晚方面, 韩荣青等发现2000年以来北方各地初霜(冻)日期推迟最为明显^[4]。1970-2009年山西省初霜日在显著推后, 并且在2000年发生了突变^[5]。与其紧邻的陕西省也是表现出初霜日推迟的趋势, 推迟幅度约为1.4 d/10 a^[6]。1960-2011年新疆地区初霜日推迟了11天^[7], 推迟的速率为2.21 d/10 a^[8]。气候变暖背景下整个西北地区初霜日平均以1.8 d/10 a的速率推迟, 并在1986年出现明显的突变^[9-10]。近50年西藏主要农区部分站点初霜日呈现推迟趋势^[11]。横断山脉地区初霜日以1.09 d/10 a的速率推迟^[12]。对

收稿日期: 2015-07-02; 修订日期: 2015-09-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划973项目(2012CB955804); 国家自然科学基金项目(41171438, 41201602); 中国博士后科学基金项目(2015M570626) [Foundation: National Basic Program of China (973 Program), No.2012CB955804; National Natural Science Foundation of China, No.41171438, No.41201602; The China Postdoctoral Science Foundation of the Fifty-seventh Batch of Funds, No.2015M570626]

作者简介: 宁晓菊(1987-), 女, 河南商丘人, 博士, 主要从事区域可持续发展研究。E-mail: nxj0655@163.com

通讯作者: 秦耀辰(1959-), 教授, 博士生导师, 主要从事区域可持续发展理论、模型与信息系统研究。

E-mail: qinyc@henu.edu.cn

于南方的重庆,近40年来初霜日总体呈现推后趋势^[13]。

对于终霜日出现早晚,李芬等认为虽然山西省平均终霜日以波动为主,但是细化到具体区域,山西省大部分地区终霜日在1975-1996年间发生了突变,提前幅度较大的地区主要位于中西部和南部的广大地区,推后幅度较大的地区集中在西北部及中东部^[14]。陕西省平均终霜日以1.7 d/10 a的幅度提前^[6]。新疆地区终霜日在1960-2011年提前了7天,提前的幅度为1.41 d/10 a^[7-8]。东北和华北地区1963-2009年终霜日在显著提前^[15]。1990s横断山脉地区终霜日明显提早^[12],重庆地区的终霜日则是在推后^[13]。

受初、终霜日变化的影响,无霜期的长短也有变化。研究发现,一些区域初霜日推后和终霜日提前共同作用带来了无霜期的延长,如西北地区、山西省、陕西省和横断山脉地区等^[5-8, 10, 12]。在重庆地区,初霜日和终霜日均是推后趋势,但是初霜日推后的速率大于终霜日,带来了无霜期的缓慢延长^[13]。另外,部分研究并不考虑初、终霜日出现早晚,只是关注无霜期的变化趋势发现,1961-2010年宁夏全区平均无霜期以4.7 d/10 a的速率延长,并且在1982年发生突变^[16],东北地区无霜期的延长速率为3.5 d/10 a,无霜期等值线在向北移动^[17]。在西藏地区,多是分析霜冻日数的变化来间接反映无霜期的长短:拉巴次仁等发现近30年内西藏霜冻日数表现为不同程度的减少趋势^[18],杜军等使用R/S方法预测西藏主要农区霜冻日数,认为未来霜冻日将会继续趋于减少^[11],这意味着西藏多数地区的无霜期在逐渐延长。

显然,当前对无霜期的研究具有时间不一致性和区域性,无霜期在全国的演变趋势尚不明晰。其次,将初、终霜日与无霜期的变化结合起来分析可以更深刻的认识三者的变化趋势及相关关系,目前将三者结合进行研究尚且不多。再次,只有部分研究对无霜期进行了突变分析。因此,本文基于以上三点,立足于全国综合农业区划的九大农业区,首先评估各农区初、终霜日和无霜期的总体分布情况及变化趋势,其次以气象站点为基本文对象进行空间插值,分析初、终霜日和无霜期在全国的分布特征,模拟三者的线性趋势及相互关系,并对无霜期进行突变检验,查看无霜期突变的时空分布。

2 数据与方法

农业生产中将入秋以来地面温度第一次和最后一次低于0℃的日期称为初霜日和终霜日,自终霜日到初霜日之间的天数称为无霜期(反面则是霜期)^[19]。显然根据地面温度计算初霜日和终霜日更加合理^[4],但是由于实际地面温度较难获取,通常使用日最低气温代替。本文根据日最低气温低于0℃的初日和终日计算初、终霜日及无霜期,同时为便于分析初、终霜日的变化趋势,用儒略日定义日期,将1月1日定为1,1月2日定为2,随之顺序增加。

累积距平是一种常用的、由曲线直观判断变化趋势的方法^[20],根据中国综合农业区划划分出的九大农区^[21](图1),使用累积距平曲线查看各农区初终、霜日和无

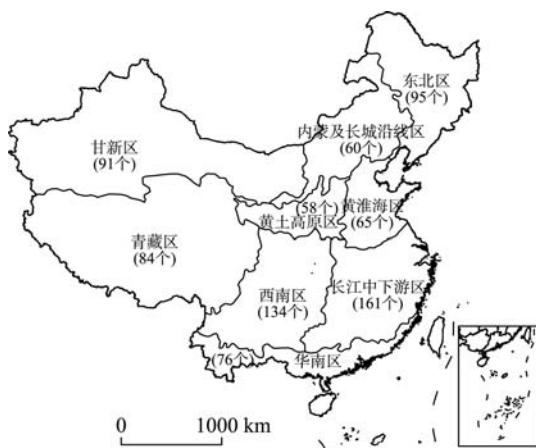


图1 中国农业区及气象站点的分布

Fig. 1 Agricultural regions and meteorological stations in China

霜期的演变趋势。线性倾向估计可以刻画气候序列的变化趋势和变化速率^[20], 在此以气象站点为基本单元, 构建每个站点初、终霜日和无霜期的线性倾向模型, 分析其变化趋势及显著程度。Mann-Kendall 检验可以分析气候是否从一种稳定态 (或稳定持续的变化趋势) 跳跃式地转变到另一稳定态 (或稳定持续的变化趋势)^[22], 可以借助Matlab编写程序对每个站点进行 Mann-Kendall 检验, 分析站点尺度上的突变特征。同时, 使用普通克里金方法将站点的初、终霜日和无霜期平均值、标准差空间化, 分析它们在全国的分布情况。考虑到站点的线性倾向率、站点的突变特征和发生突变的时间与经纬度、海拔等关联不大, 使用IDW 插值方法将初、终霜日和无霜期的线性倾向率、站点突变趋势空间化。

本文使用中国气象科学数据共享服务网提供的 1951-2012 年中国国家 824 个气象站日最低气温观测资料, 各农区分布的站点数详见图 1。有关该数据集, 1951 年全国只有 152 个气象站, 随后几年全国气象站数量快速增加, 至 1960 年气象站达到 766 个, 并在 1989 年出现 1 个季节站。因此, 本文以气象站具体建站时间为起点, 剔除季节站和缺测数据, 根据具体的研究目的和研究方法对数据的要求, 决定是否将该站点纳入分析中。具体说来, 在剔除季节站和缺测数据后, 计算初、终霜日和无霜期在各农区的变化趋势及在全国的平均分布; 其次, 在构建各站点的线性倾向模型时, 考虑到使用年际或年代际数值构建模型其自由度不符合要求、影响拟合效果, 采用 5 年平均值构建模型, 此时剔除部分建站时间晚、其自由度不允许参与模型构建的气象站点, 也剔除南方农区无霜期多年来均为 365 天 (闰年为 366 天), 不存在初、终霜日的站点, 最终对 726 个站点分别构建模型; 最后, 考虑到需要用逐年数据进行 Mann-Kendall 突变检验, 剔除存在缺测年份的站点和多年来无霜期均达到上限值、不可能发生突变的站点, 最后保留 659 个站点参与突变检测。同时, 在全国农业综合区划中, 东部季风区内秦岭淮河以北的东北区、内蒙及长城沿线区、黄淮海区 and 黄土高原区统称为北方农区, 秦岭淮河以南的西南区、长江中下游区和华南区统称为南方农区^[21], 本文在分析中也使用了这种表述。

3 结果分析

3.1 农区初、终霜日和无霜期的分布演变

分区比较 1951-2012 年中国初、终霜日出现早晚和无霜期长短 (表 1)。相对于其他农区, 青藏区最早进入初霜、最晚结束终霜, 是无霜期最短的一个农区。东北区和内蒙及长城沿线区初、终霜日出现时间比较接近, 两农区无霜期的长度也基本相等。甘新区初霜日较内蒙及长城沿线区晚一周左右, 并且其终霜日较内蒙及长城沿线区提前半个月出现, 故甘新区无霜期较内蒙及长城沿线区长 20 天, 黄土高原区的初、终霜发生时间较甘新区分别推迟和提前一周左右。位于黄土高原区东部的黄淮海区初霜于 10 月下旬发生, 来年 3 月下旬终霜结束, 平均无霜期为 229 天。较之北方农区, 南方长江中下游区和西南区内部不同地区初、终霜日出现早晚和无霜期长短差异较大, 两农区内部自北向南初霜日依次在 11 月、12 月或来年 1 月出现, 终霜日也相应变化, 二者无霜期在 200~365 天之

表 1 中国各农区初终霜日出现早晚及无霜期长度
Tab. 1 First frost date, last frost date and frost-free period in agricultural regions in China

区域	初霜日	终霜日	无霜期(天)
青藏区	9月18日	5月27日	116
东北区	10月3日	5月3日	154
内蒙及长城沿线区	10月1日	5月2日	152
甘新区	10月9日	4月19日	173
黄土高原区	10月22日	4月13日	192
黄淮海区	11月10日	3月26日	229
西南区	不固定	不固定	300
长江中下游区	不固定	不固定	295
华南区	不固定	不固定	363

间变动, 平均无霜期是 300 天左右。华南区全年基本为无霜期, 多年平均状态下华南区的无霜期为 363 天, 该地区不存在比较固定的初、终霜日。

比较各农区初、终霜日出现早晚和无霜期长短的累积距平特征 (图 2), 考虑到南方农区全部或部分地区的初、终霜日出现早晚跳跃性比较强, 因此在分析初、终霜日累积距平时剔除华南区、西南区和长江中下游区, 只是分析三者无霜期的变化特征。

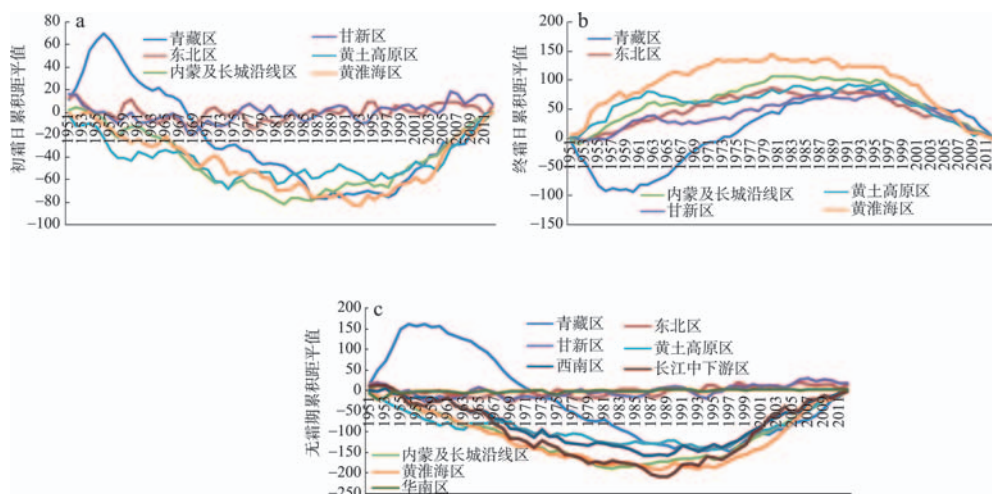


图2 中国农区初、终霜日和无霜期累积距平

Fig. 2 Trends of the first frost date, last frost date and frost-free period in agricultural regions in China

青藏区初霜日累积距平在 1950s 中后期上升到波峰后开始持续下降, 在 1980s 末下降到波谷后又开始上升, 其终霜日累积距平则是在 1950s 末下降到波谷后开始上升, 并在 1972 年变为正值后继续增加, 在 1995 年前后达到波峰后再次下降。这表明青藏区的初、终霜日均在 1950s 中后期与 1990s 初期发生了转折, 二者共同影响下青藏区无霜期累积距平分别在 1950s 末期和 1990s 初形成了波峰和波谷, 发生两次转折。因此, 青藏区无霜期在 1950s 呈现延长特征, 随后表现为缩短趋势, 在 1990s 开始再次出现延长趋势。

内蒙及长城沿线区、黄土高原区和黄淮区的初、终霜日与无霜期累积距平特征基本一致: 三者的初霜日累积距平均是先下降, 在 1980s 末下降到波谷, 随后又逐渐上升; 三者的终霜日累积距平则是先逐渐上升、在 1980s 中期前后上升到波峰, 随后逐渐下降。显然, 三者的初霜日在 1980s 末期发生转折, 转折前是初霜日逐渐提前、转折之后则是初霜日逐渐推后。三者的终霜日则是先推后、到 1980s 中后期开始提前, 因此三者的无霜期表现为先逐渐缩短、到 1980s 末期较快延长的态势。

东北区、甘新区的初、终霜日及无霜期累积距平变化特征较为一致, 二者的初霜日和无霜期呈现波动特征, 终霜日则是距平值先增加, 在 1980s 中期开始减小。西南区、长江中下游区无霜期累积距平均是先逐渐下降、到 1980s 后期跌至谷底后开始上升。由于华南区无霜期距上限值较近, 相对于其他农区, 华南区无霜期累积距平的变化趋势并不明显。因此, 多数农区的初、终霜日和无霜期在 1980s 中后期或 1990s 初期发生了突变。

3.2 全国初、终霜日和无霜期的空间分布

全国无霜期平均值自南向北随纬度增加依次递减, 自东向西随海拔阶梯升高依次递减 (图 3a)。具体而言, 整个华南区、西南区大部分区域和长江中下游区南部无霜期在 300 天以上, 西南区和长江中下游区北部无霜期多位于 250~300 天的段位。无霜期 200 天等值线自黄淮海区北端起沿黄土高原区、西南区向西南方向到达青藏区东南边缘, 西南

区和青藏区相邻区域是无霜期等值线变化最急剧的地方。青藏区大部分地区无霜期在100天以下，这在于部分区域属于永冻层，日平均气温常年位于0℃左右，致使无霜期只有几天或不存在。甘新区无霜期多半在150~200天段位，不过南疆地区由于天山阻挡气温偏高而无霜期较长，甘新区北端由于纬度高、海拔高的原因无霜期也相应缩短。无霜期150天等值线基本将内蒙及长城沿线区、东北区分成两部分，北部属于150天以下的低值区，南部属于150~200天段位的高值区。

无霜期标准差值在全国总体呈现西部高、东部低，南方高、北方低的分布特征，标准差高值区位于青藏区、西南区和长江区，不过无霜期标准差的最低值多位于华南区(图3b)。这与叶殿秀等人的研究相似，但是在数值上有所出入，这在于本文使用的是1951-2012年数据，而他们选用的是1961-2007年，时间序列的不同导致数据波动幅度不完全一致^[23]。结合初、终霜日的标准差分析无霜期标准差空间分异的原因(图4)：冬半年北方冷空气到达南方时的强弱程度影响南方的初、终霜出现，故南方的西南区和长江中下游区初、终霜日出现时间年际变化大、比较离散，导致两农区无霜期标准差较大。华南区基本不存在初霜和终霜，全年几乎为无霜期，无霜期标准差值最低。在青藏区，初、终霜日的标准差值均在8天以上，不过春季终霜日变动幅度要大于秋季初霜日的变动幅度，造成青藏区无霜期的变动幅度较大。对于北方农区和甘新区，秋季初霜日标准差在空间上的分布较为规整，而春季终霜日标准差则是连片低值区上嵌套高值区，终霜日标准差值在空间上的分布较为破碎，这与这些农区无霜期标准差大片低值区上散布高

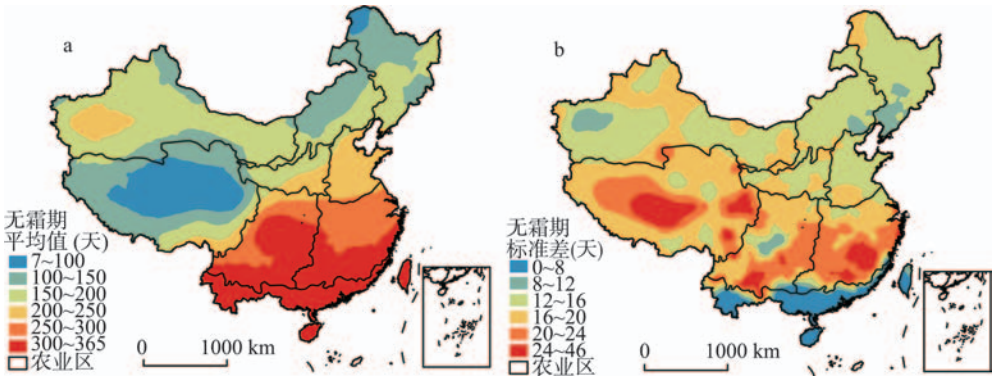


图3 中国无霜期平均值和标准差的空间分布

Fig. 3 Mean and standard deviation of the frost-free period in China

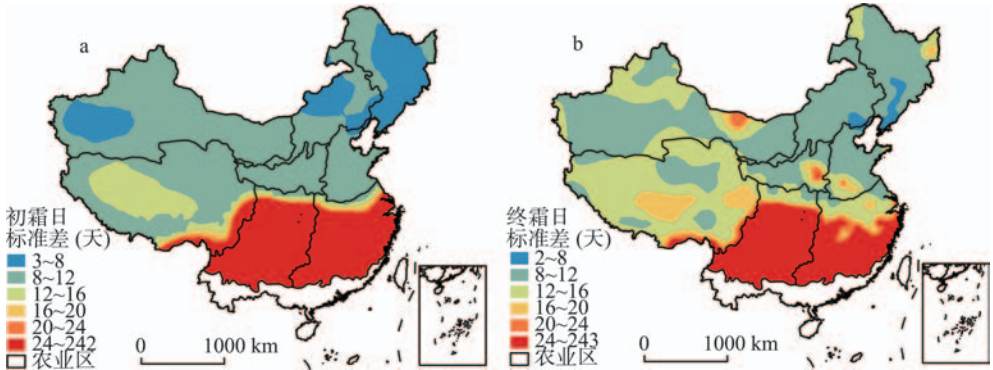


图4 中国初、终霜日标准差的空间分布

Fig. 4 Standard deviation of the first frost date and last frost date in China

值区的特征更为一致。

3.3 全国初、终霜日和无霜期变化趋势

3.3.1 初、终霜日和无霜期的线性趋势 全国初霜日线性倾向率基本上自南向北随着纬度增加而增加，而且80%以上区域初霜日线性倾向率为正值，少数为负值的区域主要分布在西南区和长江中下游区，因此全国初霜日多呈现推后趋势（图5a）。首先，西南区和长江中下游区是空间上初霜日变化最复杂的两农区，它们的中南部是初霜日提前趋势分布的集中区，其余地区初霜日是推后趋势，在北端又出现推后幅度0.3以上的高值区，而且两农区的多数站点变化趋势不显著。其次，初霜日推后幅度最大的区域主要分布在内蒙及长城沿线区及与其紧邻的甘新区东部、东北区中西部和黄淮海区，这些农区超过50%的站点的推后趋势通过显著检验。最后，青藏区、甘新区中西部和黄土高原区以初霜日推后幅度0.15~0.3的相对高值为主要特征，同时也存在推后幅度0.3以上的高值区和提前趋势的斑点，并且40%站点的推后趋势通过显著检验。因此，初霜日推后趋势的高值区和相对高值区主要分布在北方农区、甘新区和青藏区，内蒙及长城沿线区及其周边区域是初霜日显著推后的高值区。初霜日推后趋势的低值区和提前趋势影响区主要位于西南区和长江中下游区，在青藏区、甘新区和东北区北端也有斑点状分布，不过多数不显著。

全国终霜日线性倾向率自南向北基本随着纬度的增加而减小，80%以上区域终霜日线性倾向率为负值，少数为正值区域主要分布在西南区和长江中下游区，因此全国终霜日多呈现提前趋势（图5b）。首先，西南区和长江中下游区是终霜日线性倾向率高、中、低值均存在的农区，两农区的南端和西南区的中北部终霜日是推后趋势，其他地方

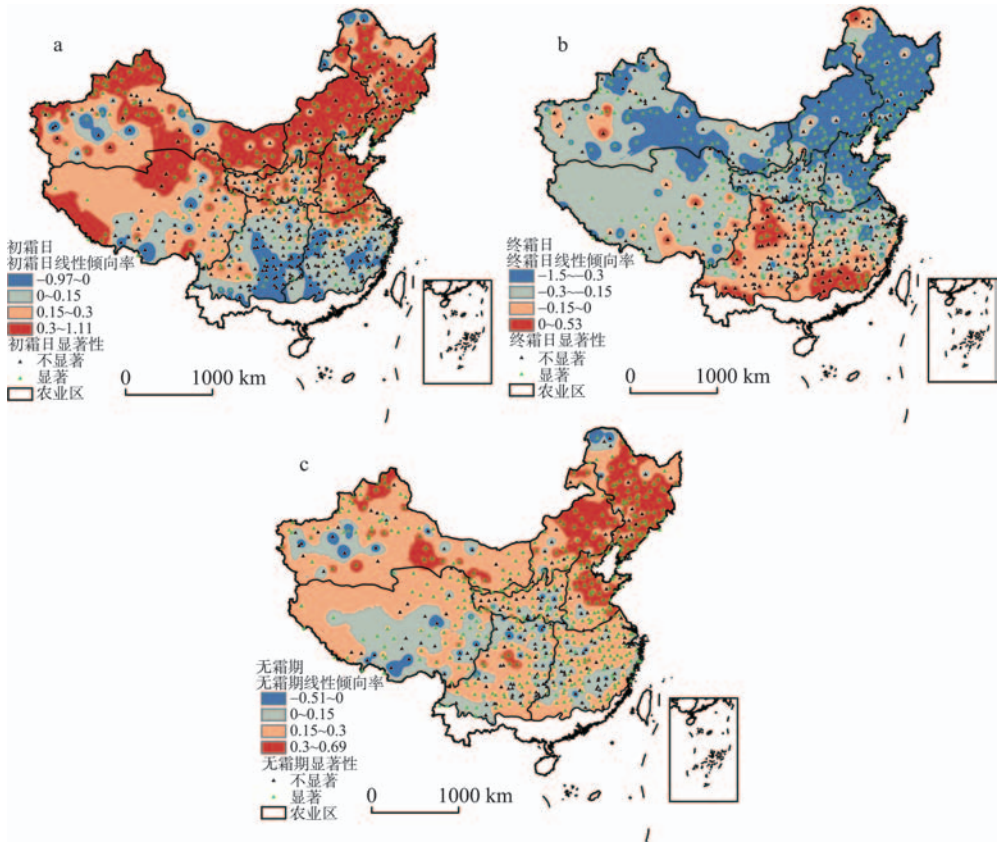


图5 中国初、终霜日和无霜期的线性趋势分布

Fig. 5 Trends in changes of the first frost date, last frost date and frost-free period in China

是提前趋势, 长江中下游区的北部分布提前幅度大的斑块, 不过 75% 的站点的这些变化趋势不显著。其次, 终霜日线性倾向率的最低值主要分布在东北区、内蒙及长城沿线区、黄淮海区东部和甘新区的中部, 它们是终霜日提前幅度最大的区域, 并且超过 70% 的站点通过显著检验。最后, 青藏区和黄土高原区终霜日提前幅度相对较大, 两农区通过显著检验的站点比例分别是 60% 和 40% 左右。同时青藏区、甘新区西部和东北区北端也分布终霜日推后趋势的斑点, 不过基本不显著。因此, 北方农区和青藏区以春季终霜日显著提前为主要特征, 南方农区则是终霜日推后与提前并存并且多数不显著。

全国无霜期线性倾向率基本是南部低、北部高, 西部低、东部高, 其中 90% 以上区域是正值区, 负值区以斑点形式零星地散落于各农区, 所以, 全国无霜期基本是延长趋势, 并且 60% 以上站点的延长趋势显著 (图 5c)。结合初、终霜日的变化趋势分析无霜期在各农区的分布特征: 东北区的中南部和内蒙及长城沿线区初霜日推后和终霜日提前幅度均大造成其无霜期线性倾向率也高, 因此这些区域无霜期大幅延长, 并且多数是显著延长的特征。而在东北区的北端, 则是初霜日提前和终霜日推后共同作用带来无霜期的缩短, 但是不显著。对于甘新区, 南疆地区和内蒙古西部出现无霜期线性倾向率为负值的斑点, 无霜期为缩短趋势; 其北端和河西走廊的西段是无霜期线性倾向率的高值区, 其余地区是相对高值区, 无霜期表现为显著延长趋势。

黄土高原区初霜日线性倾向率相对高值和终霜日线性倾向率相对低值带来多数区域无霜期线性倾向率的相对高值, 故该农区多是初霜日推后和终霜日提前从春秋两端延长了无霜期, 同时该农区也存在少量无霜期缩短的斑点。黄淮海区初霜日推后和终霜日提前导致整个农区无霜期的延长, 并且在农区大部分区域三者的变化趋势均通过显著检验: 其东部无霜期线性倾向率的高值由初霜日线性倾向率高值和终霜日线性倾向率低值影响形成, 其余地方相对高值由初霜日线性倾向率相对高值和终霜日线性倾向率相对低值影响。青藏区 90% 以上的区域无霜期为延长趋势, 但是延长的幅度存在区域差异, 同时 60% 的站点延长趋势显著。总体上青藏区无霜期的延长趋势由初霜日推迟和终霜日提前共同造成, 不过初霜日推迟和终霜日提前幅度在农区北部和中南部存在差异, 形成无霜期延长幅度的南北差异。

南方农区是初霜日提前和终霜日推后集中分布的农区, 理论上会使无霜期缩短。然而, 两农区初霜日提前和终霜日推后的影响区在空间上并不重合, 使得一些区域初霜提前的幅度小于终霜提前幅度, 或者终霜推后的幅度小于初霜推后幅度, 这依然缩短了霜期, 延长了无霜期。所以, 在长江中下游区北部和西南区东北部, 无霜期显著延长由于初霜日推后和终霜日提前共同影响; 在长江中下游区中部和西南区西北部, 无霜期小幅延长在于终霜提前幅度大于初霜提前幅度; 对于长江中下游区南端和西南区中南部, 无霜期小幅延长源于初霜推后幅度大于终霜推后幅度。故南方农区 85% 的区域无霜期表现为延长趋势。

因此, 初霜日的推后幅度、终霜日的提前幅度和无霜期的延长幅度均是北方大于南方, 北方农区、甘新区、青藏区和南方农区部分区域的初霜日推后和终霜日提前从春秋两端延长了无霜期, 而南方农区的部分地区无霜期延长则是初霜日推后幅度大于终霜日推后幅度或终霜日提前幅度大于初霜日提前幅度造成。从变化趋势的显著程度看, 北方农区、甘新区和青藏区初霜日显著推后、终霜日显著提前和无霜期显著延长的站点比例均高于南方农区。

3.3.2 无霜期的突变趋势与空间分布 给定置信区间 $u = 0.05$, 对无霜期进行 Mann-Kendall 突变检验, 结果显示所有站点的 UF_k 和 UB_k 两条曲线均存在交点。其中, 交点是两个或两个以上的称之为波动性站点, 具有一个交点且在置信区间以内称之为发生了显

著突变, 具有一个交点但位于置信区间以外称之为突变不显著。从站点数量看, 具有波动特征的站点和具有突变特征的站点数分别占参与检验站点的44.2%和55.8%, 其中51%的站点属于显著突变。进一步说, 49.7%是无霜期表现为延长趋势的站点(328个)发生了显著突变, 它们分布在各个农区, 至少占各农区站点总数的40%以上。将这些站点特征空间化(图6a), 可以发现, 全国无霜期显著突变和波动性区域基本上相间分布, 不过, 北方农区、甘新区和青藏区基本上是显著突变的区域面积占优势, 南方农区则是波动性区域面积占优势。具体说来, 无霜期显著突变的区域主要分布在内蒙及长城沿线区、青藏区和黄淮海区, 东北区的中西部、甘新区的东部和天山两侧也有较多分布, 在其他农区的分布相对比较破碎。无霜期为波动特征的区域主要分布在黄土高原区、西南区、长江中下游区和青藏区的东南部, 在其余农区的分布相对破碎, 属于突变不显著的区域主要分布在波动性与显著突变区域之间的狭长过渡带。

分析无霜期开始突变的年份, 1951-2012年共有46个年份发生了显著突变, 前20年发生突变的站点较少, 自1978年起发生突变的站点数开始平稳增加(每年超过5个站点无霜期发生突变), 在1994年突变站点数量达到高峰。因此考虑到突变年份具有集聚特征, 按照年代分割为基础、适当调整的原则划分出1951-1970、1971-1980、1981-1990和1991-2012年4个时间段分析突变年份的分布情况(图6b)。全国无霜期基本是在1980年以后发生突变, 而1991-2012年发生突变的区域面积比例占优势。首先, 前30年无霜期发生突变的区域基本在各农区以斑点形状出现, 长江中下游区、西南区、内蒙及长城沿线区和东北区是斑点数量较多或斑点面积较大的农区。并且1951-1970年和1971-1980年间发生突变的区域在空间上基本相邻分布。其次, 1981-1990年无霜期发生突变的区域主要分布在东部农区的南北两端, 即北部是内蒙及长城沿线区、东北区的北部和黄淮区北部, 南部是西南区和长江中下游区的中南部。甘新区的天山两侧和青藏区的东部边缘也是在1981-1990年发生突变。最后, 青藏区、甘新区大部、黄土高原区大部、东北区中南部和西南区中北部无霜期主要是在1991-2012年间发生突变。因此, 从无霜期突变发生时间的早晚看, 东部季风区内农区多是在1980s发生突变, 并且其内部南北两端发生突变的时间早于中间区域, 西部非季风区两农区则多是在1990s发生突变。

显然, 北方农区多是初霜日大幅推后、终霜日大幅提前和无霜期大幅延长, 而且初、终霜日在62年内波动幅度不大, 其无霜期多从1980年后发生显著突变。说明这些农区秋季初霜和春季终霜分别在逐渐提前和推后, 无霜期逐渐延长, 并在1980年以后开始

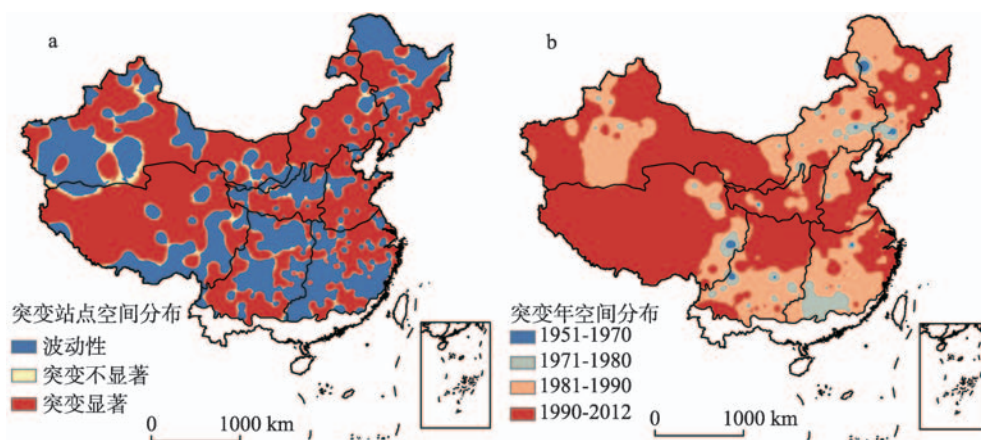


图6 中国无霜期的突变区域和突变年份分布

Fig. 6 Mutation of regions and mutation time of the frost-free period in China

加速延长。这对于东北区和内蒙及长城沿线区南部的种植业来讲,可以从春秋两端延长作物的生长期,使作物播种时间提前,或者降低秋季初霜对作物生长后期的危害。在黄淮区,多种植冬性和半冬性的冬小麦,春季冬小麦拔节后抗霜冻的能力会迅速减弱。虽然终霜日的提前可以减弱这一危害,然而终霜日的提前与升温密切关联,气候变暖趋势下小麦拔节提早,在遇到倒春寒天气后很容易发生霜冻害^[24-25]。

甘新区和青藏区是以牧业为主的两农区,初、终霜日和无霜期的变化对此的影响相对较少。但是在甘新区的绿洲地区和青藏区海拔3800 m以上种植青稞和油菜的高寒区,春季终霜日和秋季初霜日是作物开始播种和停止生长的重要指标,终霜推后和初霜提前有利于延长作物的生长期,降低霜冻对作物危害的可能性,增加作物成熟的保证率,也利于青藏区河谷地区冬小麦的安全越冬。在黄土高原区,大部分区域初、终霜日和无霜期的变化也有利于种植生育期长的作物或品种以增加作物产量或提高农产品质量。在南方农区,无霜期的延长原因存在空间差异:可分为初霜日推后和终霜日提前共同作用,初霜推后幅度大于终霜推后幅度和终霜提前幅度大于初霜提前幅度三种形式,这意味着南方农区可以利用无霜期延长增加的热量资源调整作物布局,如将部分作物种植边界北移、改种生长期较长的作物品种等。然而,也需要注意无霜期延长趋势下霜冻不规律出现造成的气象灾害^[26],如在旬或月平均气温较高时,日最低气温连续3天低于5℃就可以在南方农区发生寒害,更遑论日最低气温低于0℃的霜日出现。因此为适应气候变化调整南方农区的作物布局需谨慎,以减少和降低气象灾害。

4 讨论

本文分别以农区和气象站点为基本单元分析了1951年以来全国初、终霜日和无霜期的变化趋势及突变特征,在研究的时空尺度、变化趋势和三者间的相互关系等方面验证了部分已有研究结论,并有所深化和提高。首先,本文在一些区域验证了部分研究结论。如研究发现东北区、内蒙及长城沿线区和黄淮海区多是初霜日推后、终霜日提前和无霜期延长,这与韩荣青等对北方地区秋季初霜冻和戴君虎等对东北、华北地区春季终霜冻的研究结论比较一致^[4, 15];对甘新区的分析与部分学者对整个西北地区或西北局部区域初、终霜冻及无霜期的分析较为一致^[7-9],在黄土高原区山西地区的分析结果与李芬和钱锦霞等人有关初霜、终霜的变化趋势比较一致^[14, 5];拉巴次仁等得出西藏霜冻日数表现为不同程度的减少趋势^[18],与本文得出青藏区多数无霜期在延长是相互补充的。其次,本文扩充和深化了部分研究,具体分为两点:一是对全国初、终霜日和无霜期的变化有了更加全面、直观的认识。研究得出全国初、终霜日和无霜期的标准差是南方大于北方、西部大于东部,初霜日推迟幅度、终霜日提前幅度和无霜期延长幅度则多是北方大于南方、东部大于西部。说明北方农区初霜日和终霜日分别在平稳推后和提前,无霜期在平稳延长,而南方农区初霜日、终霜日和无霜期年际波动相对较大,线性变化趋势相对北方较弱。同时无论是农区尺度还是站点尺度,全国无霜期多在1980年以后发生突变,突变的时间集中在1980s中后期和1990s前期。二是明确了全国初、终霜日和无霜期三者相互关系的空间分异。研究认为北方农区、甘新区和青藏区多是初霜日推后、终霜日提前共同发生造成无霜期的延长,而南方农区无霜期的延长则由初、终霜日更复杂的变化趋势形成了三种延长类型。

另外,由于无霜期存在明确的取值范围,华南区全年基本是无霜期,无法进行趋势分析和突变检验,因此对华南区有效生长期的探讨可以改用生长季有效积温^[19]。戴声佩等已经就华南地区10℃积温的时空变化进行了深入分析^[27],可以较好地填补本文在华南

区讨论的缺失。其次,按照儒历日将初、终霜日进行换算,南方地区一些站点的初、终霜日可能在年底(12月)或来年年初(1月)之间摆动,实际上相邻两年的初霜日或终霜日发生时间间隔不长,但是换算后可能会居于取值范围的两端,这样可能会带来西南区和长江中下游区部分地区初、终霜日的标准差值偏大和伪变化趋势,影响分析结果。

5 结论

(1) 1951年以来,全国无霜期呈现自南向北随纬度增加而减少、自东向西随海拔升高而减少的特征,初、终霜日和无霜期的标准差也基本是自南向北随纬度增加而减少,但是自东向西随海拔升高而增加。表明南方初、终霜日和无霜期的年际间波动幅度大于北方,西部初、终霜日和无霜期的年际间波动幅度大于东部,故北方农区、东部地区初、终霜日和无霜期的年际变化更为平稳。

(2) 全国80%以上区域表现为初霜日推后、终霜日提前和无霜期延长的趋势,但是三者的变化幅度、相互关系存在农区差异。从线性倾向率分布看,全国初霜日推迟幅度、终霜日提前幅度和无霜期延长幅度多是北方农区大于南方农区、东部农区大于西部农区;在三者相互关系方面,北方农区、甘新区和青藏区多是初霜日推后和终霜日提前共同作用从春秋两端延长了无霜期,西南区和长江中下游区部分地区与此相同,其他地区则是初霜日推后幅度大于终霜日推后幅度或终霜日提前幅度大于初霜日提前幅度带来无霜期的延长。

(3) 全国过半区域的无霜期在1980s和1990s发生了显著突变。东北区中西部、内蒙及长城沿线区、黄淮海区、青藏区和甘新区大部是无霜期显著突变的集中分布区,黄土高原区、西南区、长江中下游区和青藏区东南部无霜期主要是波动特征。突变时间上,东部季风区内农区多是在1980s发生突变,不过东北区的东南部、秦岭淮河两侧地区是在1990s发生突变,西部非季风区的甘新区和青藏区多是在1990s发生突变。

(4) 理论上初、终霜日和无霜期的变化趋势可以减少春秋霜冻对作物的危害、延长作物生长期,然而具体影响需视农区与作物分布而定。对于一年一熟的东北区、内蒙及长城沿线区、甘新区、青藏区和黄土高原区,初、终霜日和无霜期变化趋势可以使作物播种时间提前,或者降低秋季初霜对作物生长后期的危害,或从春秋两端延长作物的生长期等。然而在其他农区则不尽然,如黄淮区多种植冬性和半冬性的冬小麦,春季终霜日的提前可以降低冬小麦拔节后霜冻的危害,然而在气候变暖趋势下小麦拔节提早,遇到倒春寒天气时更容易发生霜冻害;南方农区初、终霜日和无霜期的复杂关系增加了农作物布局的困难和喜温作物受害的可能性。

致谢: Ronald Briggs教授和河南大学张乐博士在英文修改过程中提供帮助,特致谢意!

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Impact, Adaptation and Vulnerability [M/OL]. Cambridge: Cambridge University Press, in press, 2014. <http://www.ipcc-wg2.gov/>.
- [2] Ramirez-Villegas J, Jarvis A, Läderach P. Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: the EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 170: 67-78.
- [3] Edmar I T, Guenther F, Harrij V V, et al. Global hot- spots of heat stress on agricultural crops due to climate change. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2013, 170: 206-215.
- [4] Han Rongqing, Li Weijing, Ai Wanxiu, et al. The climatic variability and influence of first frost dates in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 525-532. [韩荣青, 李维京, 艾婉秀, 等. 中国北方初霜冻日期变化及其对农业

- 的影响. 地理学报, 2010, 65(5): 525-532.]
- [5] Qian Jinxia, Zhang Xia, Zhang Jianxin, et al. The changing trends of the first and last frost dates over Shanxi province for the past 40 years. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(7): 802-808. [钱锦霞, 张霞, 张建新, 等. 近40年山西省初终霜日的变化特征. 地理学报, 2010, 65(7): 802-808.]
- [6] Bai Qinfeng, Li Xingmin, Zhu Lin. The changes of the frost-free periods from 1961 to 2010 and its impact on apple industry in Shanxi province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(8): 65-70. [柏秦凤, 李星敏, 朱琳. 近50年陕西省无霜期的变化及果区霜冻风险分布. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 65-70.]
- [7] Pan Shukun, Zhang Mingjun, Wang Baolong, et al. Changes of the first frost dates, last frost dates and duration of frost-free season in Xinjiang during the period of 1960-2011. *Arid Zone Research*, 2013, 30(4): 735-742. [潘淑坤, 张明军, 汪宝龙, 等. 1960-2011年新疆初终霜日及无霜期的变化特征. 干旱区研究, 2013, 30(4): 735-742.]
- [8] Zhang Shanqing, Pu Zongchao, Li Jinglin, et al. The impact of global warming on frost-free periods from 1961 to 2010 in Xinjiang. *Resources Science*, 2013, 35(9): 1908-1916. [张山清, 普宗朝, 李景林, 等. 气候变暖背景下新疆无霜冻时期时空变化分析. 资源科学, 2013, 35(9): 1908-1916.]
- [9] Chen Shaoyong. Changes in the first frost date from 1961 to 2009 in Northwest China. *Resources Science*, 2013, 35(1): 165-172. [陈少勇. 中国西北地区初霜冻的气候变化特征. 资源科学, 2013, 35(1): 165-172.]
- [10] Li Shuo, Shen Yanjun. Impact of climate warming on temperature and heat resource in arid Northwest China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(2): 227-235. [李硕, 沈彦俊. 气候变暖对西北干旱区农业热量资源变化的影响. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 227-235.]
- [11] Du Jun, Shi Lei, Yuan Lei. Responses of climatic change on the frost days in main agricultural area of Tibet from 1961 to 2010. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(3): 264-271. [杜军, 石磊, 袁雷. 近50年西藏主要农区霜冻指标的变化特征. 中国农业气象, 2013, 34(3): 264-271.]
- [12] Wang Bingyun, Fan Guangzhou, Wei Ming, et al. Frost spatial and temporal variations analysis in Hengduan Mountains. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2014, 34(2): 17-21. [王炳赟, 范广洲, 魏鸣, 等. 横断山脉地区霜冻时空分布变化特征分析. 高原山地气象研究, 2014, 34(2): 17-21.]
- [13] Du Li, Zhao Guixiang, Yang Limin. The variation characteristics analysis of frost in Chongqing City in recent 40 years. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(17): 279-283. [杜莉, 赵桂香, 杨利敏. 近40年重庆市霜冻变化特征分析. 中国农学通报, 2014, 30(17): 279-283.]
- [14] Li Fen, Zhang Jianxin, Wu Yongli, et al. Spatial and temporal distribution and its impact factors of the last frost over Shanxi Province from 1961 to 2010. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1472-1480. [李芬, 张建新, 武永利, 等. 近50年山西终霜冻的时空分布及其影响因素. 地理学报, 2013, 68(11): 1472-1480.]
- [15] Dai Junhu, Wang Huanjiong, Ge Quansheng. Changes of spring frost risks during the flowering period of woody plants in temperate monsoon area of China over the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 593-601. [戴君虎, 王焕炯, 葛全胜. 近50年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化. 地理学报, 2013, 68(5): 593-601.]
- [16] Zhang Lei, Zhang Xiaoyu, Li Hongying, et al. Characteristics of frost-free days changes over Ningxia from 1961 to 2010. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 801-805. [张磊, 张晓煜, 李红英, 等. 1961-2010年宁夏无霜期变化特征. 生态环境学报, 2013, 22(5): 801-805.]
- [17] Hu Qi, Pan Xuebiao, Zhang Dan. Variation of temperature and frost-free period in different time scales in Northeast China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(1): 1-8. [胡琦, 潘学标, 张丹, 等. 东北地区不同时间尺度下气温和无霜期的变化特征. 中国农业气象, 2015, 36(1): 1-8.]
- [18] Labaciren, Suolangjiacuo, Baima. Spatial and temporal distribution of frost days over Tibet from 1981 to 2010. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 690-696. [拉巴次仁, 索朗加措, 白玛. 1981-2010年西藏霜冻日数的变化特征. 地理学报, 2014, 69(5): 690-696.]
- [19] Li Shikui, Hou Guangliang, Ouyang Hai, et al. *Agricultural climate resources and agricultural climate zoning of China*. Beijing: Science Press, 1988: 56-58. [李世奎, 侯光良, 欧阳海, 等. 中国农业气候资源和农业气候区划. 北京: 科学出版社, 1988: 56-58.]
- [20] Wei Fengying. *Modern Climate Statistics Diagnosis and Prediction Technology*. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [21] Editorial Committee of the National Agricultural Zoning Committee. *Comprehensive Agricultural Regionalization in China*. Beijing: Agricultural Press, 1981: 146. [全国农业区划委员会《中国综合农业区划》编写组. 中国综合农业区划. 北京: 农业出版社, 1981: 146.]
- [22] Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-493. [符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.]

- [23] Ye Dianxiu. Characteristics of frost changes from 1961 to 2007 over China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(6): 661-665. [叶殿秀. 1961-2007年我国霜冻变化特征. *应用气象学报*, 2008, 19(6): 661-665.]
- [24] Gu Wanlong, Ji Xingjie, Zhu Yeyu, et al. Risk regionalization of winter wheat late freezing injury in Henan province. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(3): 39-44. [顾万龙, 姬兴杰, 朱业玉. 河南省冬小麦晚霜冻害风险区划. *灾害学*, 2012, 27(3): 39-44.]
- [25] Li Maosong, Wang Daolong. Current situation and prospect of research on frost of winter wheat. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(4): 72-78. [李茂松, 王道龙. 冬小麦霜冻害研究现状与展望. *自然灾害学报*, 2005, 14(4): 72-78.]
- [26] Zhong Xiuli. Occurrence and prevention of frost injury in recent two decades. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24(1): 4-6. [钟秀丽. 近20年霜冻害的发生与防御研究进展. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 4-6.]
- [27] Dai Shengpei, Li Hailiang, Luo Hongxia, et al. The spatio-temporal change of active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in Southern China from 1960 to 2011. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 650-660. [戴声佩, 李海亮, 罗红霞, 等. 1960-2011年华南地区界限温度 10°C 积温时空变化分析. *地理学报*, 2014, 69(5): 650-660.]

Trends in the frost-free period in China from 1951 to 2012

NING Xiaoju, ZHANG Lijun, YANG Quntao, QIN Yaochen

(Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization of Henan Province, College of Environment and Planning, Key Laboratory of Geospatial Technology for Middle and Lower Yellow River Region, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: This study explores the spatial distribution of the first frost date, last frost date and the frost-free period in China through an in-depth analysis of the daily minimum temperature. Accumulative anomaly and linear trend estimation are used to describe the trends in the first frost date, last frost date and the length of the frost-free period. Then, the relationship between the first frost date, last frost date and the frost-free period is explored, and the abrupt feature of frost-free period is detected using a Mann-Kendall test. Four major results were obtained. First, the frost-free period decreases with the increase of latitude or altitude, with yearly fluctuation as latitude ascends or altitude descends. Second, over large parts of China (80%), the frost-free period is extended by both a later first frost date and an earlier last frost date. Furthermore, the magnitude of the changes in the three indices (the first frost date, last frost date and frost-free period) are higher in the north and east regions, but lower in the south and west. Third, for the majority of agricultural regions, the delayed first frost date together with an earlier last frost date prolongs the frost-free period. However, in some areas of the southwest agricultural region and the middle and lower Yangtze River agricultural region, the last frost date is later, but is more than offset by the later first frost date, or the first frost date is earlier, but is more than offset by the earlier last frost date, so the frost-free period is still be prolonged. Fourth, the mutation of the frost-free period was significant in Northeast China, Inner Mongolia and Great Wall, Huang- Huai- Hai, Qinghai- Tibet and Gansu- Xinjiang agricultural regions, which constitute half of China. With respect to timing, the mutation of the frost-free period occurred primarily in the eastern monsoon region in the 1980s and in the western non-monsoon region in the 1990s. Overall, these changes in the three indices (first and last frost date, and frost-free period length) could affect the suitability of conditions for sowing and harvesting of a variety of crops.

Keywords: frost-free period; first frost date; last frost date; trend; spatial distribution; agricultural region