

doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2018.083

郭飞燕, 綦东菊, 周斌, 等. 青岛地区气候变化对动物物候变化的影响研究 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (1): 62-73

Guo F Y, Qi D J, Zhou B, et al. Influence of climate change on the variation of animal phenophase in Qingdao area [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (1): 62-73

青岛地区气候变化对动物物候变化的影响研究

郭飞燕^{1,2}, 綦东菊^{3,2}, 周斌^{3,2},
薛允传^{1,2}

1 青岛市气象局, 青岛 266003;

2 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心, 青岛 266003;

3 胶州市气象局, 青岛 266300



摘要: 基于青岛地区气候和动物物候观测资料, 分析了气候和动物物候变化特征及两者之间的相关关系。1986—2016年青岛地区蝉始鸣期表现为小幅波动变化, 蟋蟀的始鸣期则先显著推迟后显著提前的变化趋势, 青蛙和家燕的始鸣期均有显著推迟的趋势。以上4种动物的绝鸣期均显著提前, 间隔期均明显缩短。受全球气候变暖的影响, 青岛地区气温表现为显著增温趋势, 日照时数和平均风速均呈显著减小趋势, 而降水对气候变暖的响应较小。日照时数的减少对4种动物物候期的影响最大, 有利于4种动物绝鸣期的提前和间隔期的缩短以及家燕始鸣期的推迟; 蟋蟀和青蛙的物候期对气温有明显的响应, 蝉和家燕对气温的变化不敏感; 风速的减小有利于蝉、家燕绝鸣期的提前和间隔期的缩短, 但却导致青蛙绝鸣期的推迟和间隔期的延长。多种气候因子共同作用决定了动物物候期的变化。除气候条件对动物物候期变化的影响之外, 动物之间食物链的制约关系在一定程度上也对物候变化有影响。

关键词: 气候变化; 物候变化; 始鸣期; 绝鸣期; 间隔期

引言

多种观测资料显示, 自20世纪70年代以来, 全球平均温度显著升高。IPCC第五次评估报告^[1]指出, 1880—2012年全球平均地表温度升高了0.85 (0.65 ~ 1.06) °C。受显著增温的影响, 大气、海洋、冰冻圈都经历了前所未有的变化。受赖以生存的环境条件改变的影响, 生物圈也发生了较大的变化。全球增暖已成为人类面临的最严峻的环境问题之一, 对全球生态系统和人类生存环境产生了深远的影响。1909—2011年中国尤其是北

方地区平均地表温度升高明显^[2], 且热浪、极度干旱、极端强降水等极端天气事件的发生频率也呈上升趋势^[3]。

受气候等环境因素影响, 自然界动植物也会表现出季节现象, 即自然物候变化。国内外研究者指出在气候变暖的影响下, 春季物候期提前, 秋季物候期推迟^[4], 高纬度物种的物候期提前速度较低纬度物种快近4倍^[5]。这种物候改变方式提高了植被覆盖的时间空间跨度, 但同时又改变了季节性气候特征^[6]。植物的物候变化主要受气温变化影响, Medeiros等^[7]认为物候和降水之间

收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-08-22

资助项目: 淮河流域气象开放研究基金 (HRM201601); 环渤海区域科技协同创新基金 (QYXM201614); 国家自然科学基金项目 (41741013); 青岛市气象局青年科研专项 (2016qdxq16)

作者简介: 郭飞燕, 女, 工程师, guofeiyan01@163.com; 綦东菊 (通信作者), 女, 工程师, 13573899816@126.com

没有相关性。在北半球大部分植物的生活史周期延长,而在南半球的一些物种则缩短^[8]。顾润源等^[9]研究指出,1983—2009年内蒙古草原区植物物候期总体呈提前趋势,马兰草生长期缩短,但霸王、贝加尔针茅和羊草生长期延长,说明不同草原区植物物候对气候变暖的区域响应不同。朱媛君等^[10]研究指出1983—2014年中国内蒙古呼和浩特地区春季和夏季物候期整体平均提前天数分别为7 d和4 d,秋季和冬季的物候期整体平均推迟3 d和6 d。王维玮等^[11]研究指出不同物种响应气候变暖的方向和强度存在差异,因此物候变化导致了物种间的物候不匹配。这种物候不匹配现象打破了物种间在长期协同进化中形成的种间关系,因而使一些物种的生存受到威胁。

昆虫在动物界中种类最多,数量最大,是一类与农业生产高度相关的生物,对农业生产和人类健康有很大影响。气温的升高对昆虫的生长发育、代谢速率、生存繁殖及迁徙扩散等核心生命活动产生直接影响^[12]。陈瑜等^[13]研究发现气候变暖拓展了昆虫的适生区域,导致昆虫地理分布扩大,加快昆虫的生长发育导致昆虫发生期提前。付晓伟等^[2]指出全球变暖背景下多种迁飞性昆虫逐渐向高纬度和高海拔地区迁移。韩小梅等^[14]的研究发现,在全球变暖的背景下,驻马店、沈丘、太康蚱蝉的始鸣期均呈提前趋势,其提前幅度和年际间变化与年平均气温的变化情况相对应,此外3月份和6月份的平均气温对蚱蝉始鸣期有显著的影响。翟贵明等^[15]研究指出蟋蟀的始鸣和绝鸣与平均气温有较好的相关关系,其中11月份的气温增高会导致蟋蟀绝鸣的推迟。

鸟类对气候和环境的改变非常敏感,也是日常生活中最常见和活跃的生态系统的重要组成部分之一。气候变暖使鸟类繁殖期提前^[16-17],并影响候鸟的迁徙时间^[18-19]。在中国南方地区,江苏省大丰市家燕和四声杜鹃物候变化对气候变化的响应都比较敏感,但是对不同气候要素的响应不尽相同^[20];广西桂林市动物物候期与其发生时和发生前1~5个月的气候因子相关比较显著^[21]。在中国北部地区,新疆候鸟停留期与同期日照时

数及 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温关系密切^[22];呼和浩特市武川县家燕、豆雁的物候期变化敏感气候因子为5—10月逐月平均气温以及5—10月的平均气温,其次为6、9月日照时数^[23];近20年黑龙江省虎林市豆雁始鸣期呈提前趋势,绝鸣期呈推迟趋势,始绝鸣间隔期显著延长,3月和10月气温是影响豆雁绝鸣和间隔期的主要气候生态因子,物候变化与气候变暖有相关关系^[24]。除候鸟外,在气候变化大背景下,两栖类动物如青蛙的物候期也有一定的响应,1990—1999年美国纽约州青蛙鸣叫的时间比1900—1912年提早了大约10 d^[25],中国桂林北部2—4月平均气温和3月平均最高气温是影响青蛙始鸣和始绝鸣间隔期的主要气候生态因子^[26]。

青岛地处山东半岛东南部,东、南濒临黄海,是中国北方沿海城市的代表。在全球变暖的大背景下,青岛地区气候也相应地发生了改变^[27],将对当地动物的物候期产生较大的影响。本文采用青岛地区气候和物候观测资料,分析青岛地区气温、降水、日照、风速的气候趋势变化特征,同时分析动物的始鸣期、绝鸣期和始绝鸣间隔期的变化特征,以期掌握动物物候的变化特征,从而为动物生态研究、生态环境保护的开展提供重要的指导。为了全面了解和对比不同种类动物物候期变化与气候变化的关系,本文分别采用昆虫(蚱蝉和蟋蟀)、两栖类动物(青蛙)、候鸟(家燕)观测资料进行对比分析研究。蚱蝉和蟋蟀是农田和园林的害虫,家燕和青蛙则是大自然的捕虫专家,本文研究气候变化对动物物候的影响既为全球变化研究提供重要佐证,又为指导当地有效保护有益生物、控制害虫大肆活动,保护农业生产和园林景观提供理论依据。

1 研究数据和方法

1.1 研究数据

山东省青岛胶州市地处山东半岛西南部,青岛地区的中西部,东临胶州湾,西接内陆,气候变化既包含了海洋性特征又兼具大陆特性,因此

对青岛地区气候以及物候的变化有较好的代表性。本文以青岛胶州市的气候和物候观测资料来反映青岛地区气候和物候变化特征。根据时间长且连续性好的原则,选取山东省青岛胶州市1961—2016年气象观测资料以及1986—2016年动物物候期观测资料。青岛胶州市气象局是国家农业气象观测基本站,且是青岛地区唯一的农业气象观测站。自1986年1月1日开始至今由农业气象观测人员对蚱蝉、蟋蟀、青蛙、家燕4种动物活动状态的时间进行观测记录。观测方法是根据气象出版社出版的《农业气象观测规范》^[28]中物候观测规定,观测记录4种动物的始鸣、始见,绝鸣、绝见。始鸣、始见为一年中第一次听到某种昆虫、两栖动物、鸟的叫声或第一次见到这些动物。绝鸣、绝见为一年中最后一次听到某种昆虫、两栖动物、鸟的叫声或最后一次见到这些动物。观测取得的数据和报表报送至山东省气象局和中国气象局进行统一归档保存。

1.2 研究方法

物候期采用序日,物候期出现的日期是1月1日到物候期的实际日数(d)。平均始鸣期和绝鸣期为多年平均值,始绝鸣期间隔时间也是多年平

均值。参考曹艳芳等^[23]使用的方法,采用一次线性方程对研究对象的变化趋势进行拟合。方程中的系数采取最小二乘法加以确定,并分别做线性趋势的显著性检验。采用相关分析法研究气候变化对动物物候期变化的影响。

2 青岛地区气候变化和动物物候变化特征分析

2.1 青岛地区气候变化特征分析

青岛胶州地区全年平均气温为12.6℃,5—10月平均气温基本均超过15℃,其中6—9月平均气温超过20℃(图1a),在这期间雨量充沛(图1b),是植物和动物生长活跃期。青岛全年平均风速为3.6 m/s,其中春季3—5月风速最大,平均风速为4.3 m/s。青岛平均全年日照时数为2437 h,其中3—6月和8—10月为全年日照时数最多的两个时段,其中5月日照时数达到251 h。

从长期的气候条件变化(表1)来看,1961—2016年青岛地区年平均气温表现为显著的增温趋势,气候变化倾向率为0.33℃/10a,通过了0.01的显著性检验;年平均降水量在1961—2016年间呈下降趋势(-11.48 mm/10a),但未通过显著

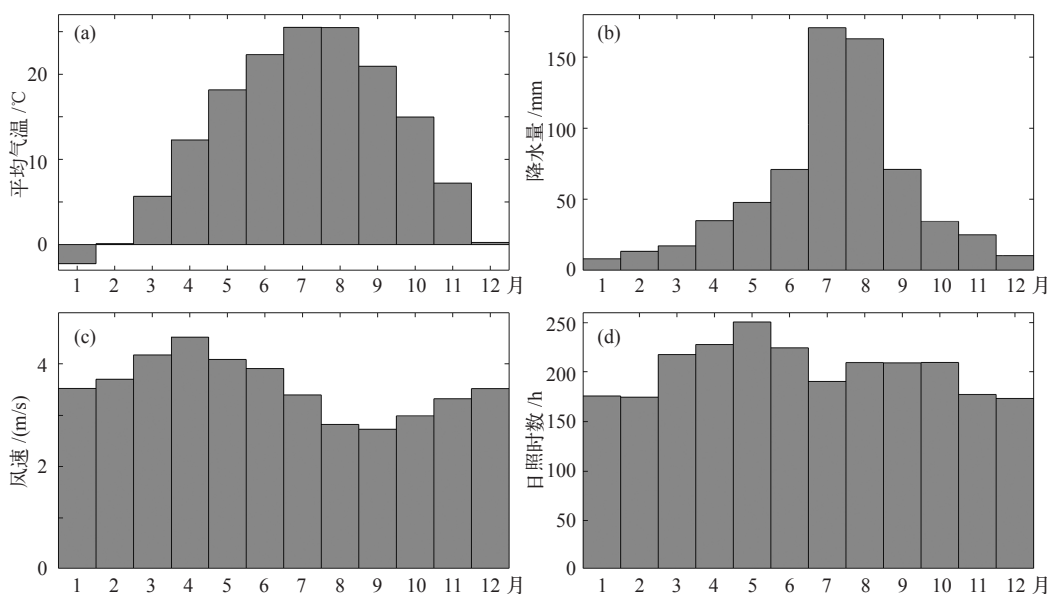


图1 青岛胶州市1961—2016年逐月平均气温(a)、降水量(b)、风速(c)、日照时数(d)

Fig. 1 The monthly mean temperature (a), precipitation (b), wind speed (c), and sunshine duration (d) in Jiaozhou during 1961—2016

表 1 1961—2016 年青岛胶州市各气候因子变化的线性倾向率
Table 1 Linear tendency rates of climate factors in Jiaozhou during 1961–2016

气象要素	年	春季	夏季	秋季	冬季
气温 /($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)	0.33**	0.36**	0.10	0.33**	0.53**
降水量 /($\text{mm}/10\text{a}$)	-11.48	2.48	-12.47	-2.74	1.25
日照时数 /($\text{h}/10\text{a}$)	-73.58**	-7.49	-25.16**	-21.50**	-19.42**
风速 /($\text{m/s}/10\text{a}$)	-0.25**	-0.30**	-0.21**	-0.19**	-0.25**

注: * 和 ** 分别表示通过了 0.05 和 0.01 显著性水平检验。

性检验; 年日照时数呈显著减少趋势, 这与杨丽慧等^[20]结果一致, 气候变化倾向率为 $-73.58 \text{ h}/10\text{a}$, 通过了 0.01 的显著性检验; 年平均风速气候变化倾向率为 $-0.25 \text{ (m/s)}/10\text{a}$ (通过了 0.01 的显著性检验), 表现为显著的减弱趋势, 这与全国风速的变化趋势一致^[29]。

从四季变化情况分析可知, 青岛地区四季平均气温均呈增温趋势, 春、夏、秋、冬四季气候倾向率分别为 0.36、0.10、0.33、0.53 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 除夏季外, 春、秋、冬季的增温趋势均通过 0.01 的显著性检验, 其中冬季的增温幅度最大; 而各季节降水量不存在明显的趋势变化; 除春季外, 青岛夏、秋、冬季日照时数整体表现为显著的减少趋势 (通过 0.01 的显著性水平检验), 尤其在植物和动物生长活动最活跃的夏季和秋季, 日照时数明显减少; 风速四季变化一致呈现明显的下降趋势 (通过 0.01 显著性水平检验), 尤其以春季最明显。

2.2 青岛地区动物物候变化特征分析

1986—2016 年青岛农业气象观测站观测的两类昆虫平均始鸣期基本一致, 其中蚱蝉和蟋蟀的始鸣期分别为 175 d 和 174 d (序日, 图 2a 和 2b), 即夏季的 6 月 25 日和 24 日。蚱蝉始鸣期最早出现在 1989 年 6 月 15 日, 最晚出现在 1998 年的 7 月 7 日, 最早和最晚仅相差 22 d。蟋蟀的始鸣期最早出现在 1986 年春末的 5 月 4 日, 最晚出现在 1998 年夏末的 8 月 22 日, 两者相差长达 110 d。相较于候鸟和两栖类动物来说, 蚱蝉始鸣期变化基本稳定, 而蟋蟀始鸣期波动变化较大。

蚱蝉和蟋蟀的平均绝鸣期均在秋季, 分别为 264 d (9 月 22 日) 和 286 d (10 月 13 日), 两者的平均绝鸣期相差约 22 d。蚱蝉和蟋蟀绝鸣期最早分别出现在 2014 年 9 月 6 日和 2012 年 9 月 22 日, 最晚分别出现在 1993 年 10 月 10 日和 1986、1991 年的 11 月 16 日。蚱蝉和蟋蟀的平均始绝鸣间隔期分别为 89 d 和 112 d, 蟋蟀的生长季比蚱蝉时间长。蚱蝉间隔期最长为 1989 年的 114 d, 最短为 2013 年的 68 d。而蟋蟀在 1986 年间隔期长达 195 d, 最短为 1998 年的 42 d。从两种昆虫的绝鸣期变化可以发现, 20 世纪 90 年代或以前昆虫的绝鸣期偏晚, 而在 21 世纪 10 年代以后昆虫的绝鸣期偏早, 由此可推断, 随着气候的变暖, 青岛地区昆虫绝鸣期逐渐提前。

1986—2016 年期间, 青岛地区两栖类动物青蛙始鸣期平均为 115 d (序日, 如图 2c), 即 4 月 26 日 (春季), 最早出现在 1986 年 4 月 4 日, 最晚出现在 2006 年的 6 月 20 日, 相差 77 d。平均绝鸣期为 268 d, 即 9 月 25 日 (秋季), 而绝鸣期最早出现在 1995 年 9 月 3 日, 最晚出现在 1991 年 10 月 27 日, 相差 54 d。青蛙在青岛地区平均始绝鸣间隔期为 153 d, 最长间隔期出现在 1991 年, 为期 204 d, 最短为 2006 年的 107 d, 最长和最短间隔期相差将近一倍。

近 31 年来青岛地区家燕始鸣期为 108 d (序日, 如图 2d), 即 4 月 19 日 (春季), 始鸣期最早出现在 1990 年 3 月 25 日, 最晚出现在 2006 年 5 月 8 日, 两者相差长达 44 d。家燕平均绝鸣期为 275 d (序日, 如图 2d), 即 10 月 2 日 (秋季), 绝鸣期最早出现在 2016 年 9 月 8 日, 最晚出现

在1991年及1993年的10月21日，最早和最晚出现时间相差43 d。家燕在当地停留时间平均为166 d，1990年家燕在当地的停留时间长达206 d，为有记录以来停留时间最长的一个候期，而在2012和2013年停留时间最短（134 d），最长和最短停留期（间隔期）相差72 d。由此推断，随着全球气候变暖的加剧，近10年家燕在当地的停留时间有所缩短。

为探究昆虫（蚱蝉和蟋蟀）、两栖类动物（青蛙）和候鸟（家燕）分别在1986—2016年多年物候变化特性及趋势变化特征，图3~5分别给出了以上4种动物的始鸣期、绝鸣期、始绝鸣间隔期的趋势变化。

对于昆虫来说，近31年来蚱蝉的始鸣期主要表现为小幅波动变化，仅有微弱的推迟趋势（图3a），推迟率为0.9 d/10a（未通过显著性水平检验）。蟋蟀的始鸣期表现为先显著推迟后显著提前的剧烈变化特征（图3d）。蟋蟀的始鸣期从1986年的123 d推迟到1998年的233 d（通过0.01的显著性水平检验）。1998年之后又开始不断提前，到2015年提前到145 d（通过0.01显著性水平检验）。蚱蝉和蟋蟀的绝鸣期均呈极显著提前趋势（图3b和3e），提前率分别为10.5 d/10a和16.9 d/10a（通

过0.01显著性水平检验）。由于近年来蚱蝉的绝鸣期不断提前，因此其间隔期也表现为极显著的缩短趋势（图3c），缩短速率为11.4 d/10a（通过0.01的显著性水平检验）。由于蟋蟀的始鸣期具有突出的分段变化趋势特性，因此其间隔期也表现为极为明显的分段趋势变化特征（图3f）。1986—2016年蟋蟀的间隔期具有一定的缩短趋势（通过0.05的显著性水平检验），缩短率为23.0 d/10a。蚱蝉是一种对树木特别是对果树有害的昆虫，蟋蟀以植物根、茎、叶、枝、种子、果实、幼苗等为食，是我国主要的农业害虫之一。近些年青岛地区蚱蝉和蟋蟀间隔期的缩短，对当地农作物、水果种植业以及草坪的健康生长、园林景观保护有利。

近31年来，青岛地区青蛙的始鸣期有显著推迟的趋势（通过0.01的显著性水平检验），推迟率为10.7 d/10a（图4a）。青蛙绝鸣期则表现为极显著提前趋势（通过0.01的显著性水平检验），提前率为11.9 d/10a（图4b）。其中1995、2014—2016年较常年明显偏早，1986—1993年较常年明显偏晚。青蛙始鸣期的推迟和绝鸣期的提前意味着青蛙的活动期明显缩短（图4c），青蛙在青岛地区间隔期变化曲线呈极显著下降趋势（通过0.01的显著性水平检验），缩短速率为22.6 d/10a。在

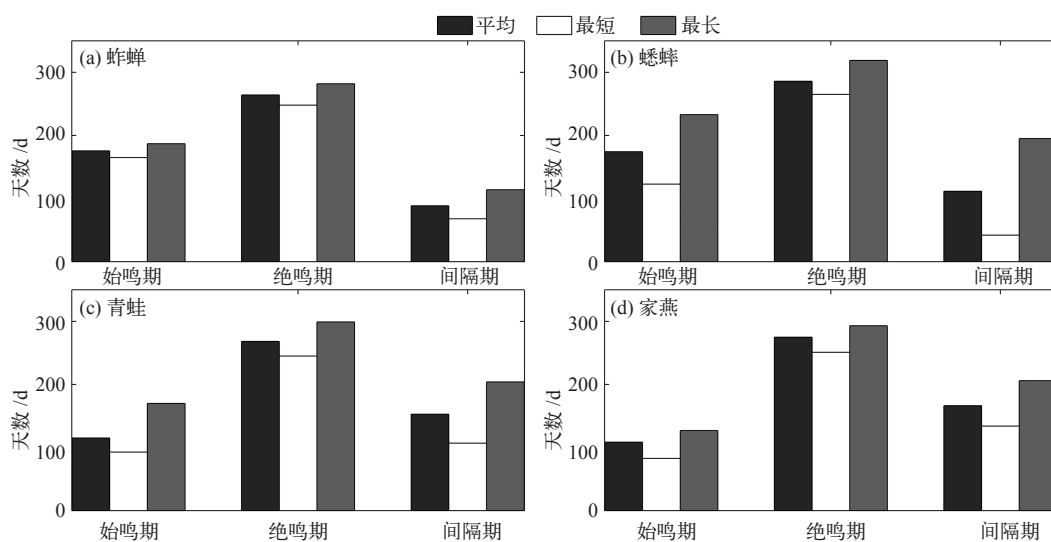


图2 青岛1986—2016年蚱蝉(a)、蟋蟀(b)、青蛙(c)、家燕(d)的始鸣期、绝鸣期、间隔期特征

Fig. 2 The characteristics of the first, last and interval song days of the *Cryptotympana atrata* (a), cricket (b), frog (c) and *Hirundo rustica* (d) in Qingdao during 1986–2016

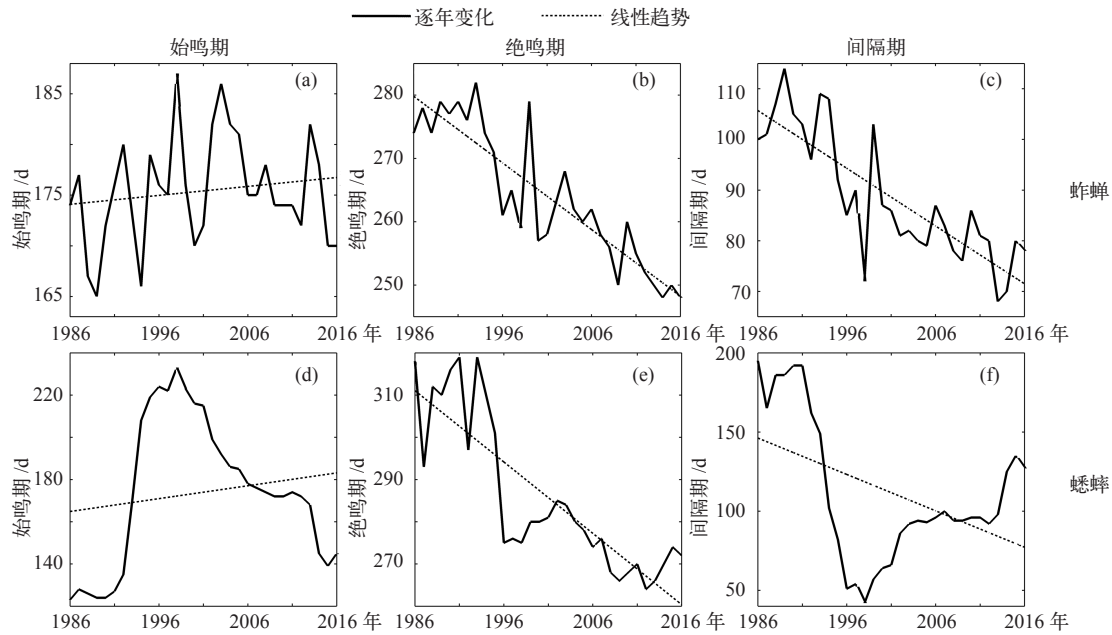


图 3 蚱蝉和蟋蟀始鸣期、绝鸣期、间隔期逐年变化特征和线性趋势

Fig. 3 The variation and tendencies of the first, last and interval song days of the *Cryptotympana atrata* and cricket

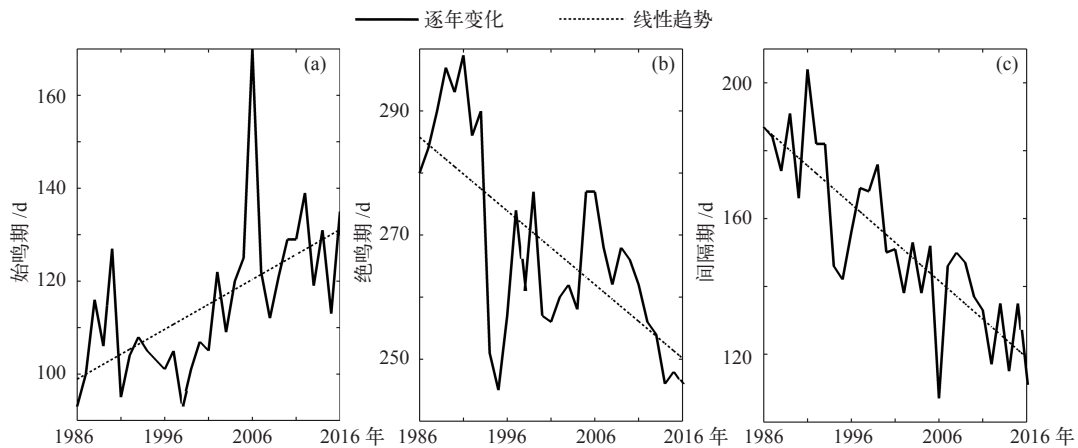


图 4 青蛙始鸣、绝鸣期、间隔期逐年变化特征和线性趋势

Fig. 4 The variation and tendencies of the first, last and interval song days of the frog

全球气候变暖的大背景下, 2007—2016 年青蛙的间隔期仅约为 1986—1995 年的 2/3。青蛙是捕虫能手、庄稼卫士。周天录^[30]指出害虫之所以大流行, 除了异常天气外, 也与青蛙等害虫的天敌明显减少有关。近些年青岛地区青蛙间隔期的逐年缩短, 对青岛地区农田、果园等农业生产势必会造成不利的影

响。从图 5(a) 中可以看到 1986—2016 年家燕始鸣期存在明显的推迟现象 (通过 0.01 的显著性

检验), 推迟率为 8.5 d/10a。从 1995 年开始家燕的始鸣期出现了突变, 自此家燕的始鸣期显著延迟。然而家燕的绝鸣期表现为显著的提前趋势 (通过 0.01 的显著性检验), 提前率为 11.1 d/10a (图 5b)。家燕的绝鸣期在 2005 年出现突变, 从 2005 年开始家燕的绝鸣期显著提前。由图 5(c) 可知家燕在青岛地区的停留期表现为极显著的缩短趋势 (通过 0.01 的显著性检验), 缩短速率高达 19.5 d/10a。家燕是大自然的益鸟, 主要以蚊、蝇等昆

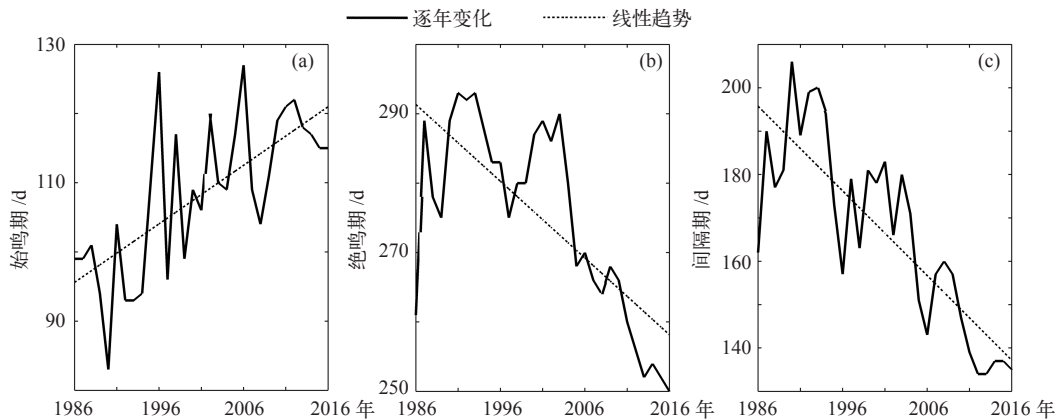


图5 家燕始鸣期、绝鸣期、间隔期逐年变化特征和线性趋势

Fig. 5 The variation and tendencies of the first, last and interval song days of the *Hirundo rustica*

虫为食,但近些年青岛地区昆虫活动期逐年缩短,因此在全球气候变暖直接或间接作用的影响下,家燕在青岛地区的停留期不断缩短。

3 气候变化对动物物候的影响

为了深入了解气候条件对青岛地区动物物候期的影响,分别计算蚱蝉、蟋蟀、青蛙、家燕的物候期与同期年平均气温、年降水量、年日照时数以及年平均风速的相关系数,并进行显著性检验分析。同时根据各研究对象始绝鸣期出现的月份,对该月前后几个月的气候因子和始绝鸣期进行相关性分析和显著性检验。此外还对4—10月和5—11月气候因子平均值与相应的动物始绝鸣期和停留期(间隔期)进行相关性分析和显著性检验(表2~5)。表中主要显示通过显著性检验的结果和必要的参数信息。

青岛地区蚱蝉的始鸣期与气温的关系并不明显,而与5月份降水显著相关(相关系数为0.37)。这是因为蚱蝉的卵在孵化前期,降水越多,湿度越大,越有利。卵孵化成为幼虫后,经过数天的时间成为成虫并开始鸣叫。蚱蝉的始鸣期与日照时数有很好的负相关关系,与6月、8月、6—10月日照时数的相关系数分别为-0.38、-0.46、-0.44。在降水一定的情况下,日照时数越长,土壤湿度越小,越不利于蚱蝉卵虫的孵化,从而导致始鸣期推迟。与青岛地区处于相近纬度的山西^[31]和河

南^[14]地区蚱蝉的始鸣期与气温却有较好的相关关系,这表明动物物候期对气候变暖的响应具有明显的地域差异,内陆地区和沿海地区可能会存在差异。蚱蝉的绝鸣期与10月气温、9—10月逐月日照时数、7—10月逐月风速有很好的相关性,因此其与6—10月平均、年平均的气温、日照时数和风速也有显著的相关关系。这是因为高温、干燥的天气有利于成虫的活动、交尾和产卵,而阴雨天蝉不活动或很少活动,交尾、产卵也少^[32]。蚱蝉的间隔期与10月气温、8月风速、6—10月气温及年平均气温和风速呈显著负相关关系,与6—10月(7月除外)逐月、6—10月和年日照时数呈显著正相关关系。在众多气候因子中6—10月平均日照时数与间隔期相关系数最高。综合以上分析可知,日照时数尤其是6—10月的日照时数对青岛地区蚱蝉物候期的变化影响最大,其次为风速的变化。在气候变暖的大背景影响下,青岛地区蚱蝉的物候变化虽然与气温变化关系较小,但是日照时数的不断减少和风速的不断减弱使蚱蝉的绝鸣期提前,间隔期也显著缩短。

蟋蟀的始鸣期与5—11月平均气温和年平均气温呈显著的正相关关系,与8月日照时数呈显著负相关,其中与5—11月平均气温相关性最好,相关系数为0.46。蟋蟀的绝鸣期与气温和日照分别为负和正的相关关系。在多个气候因子中,5—11月日照时数与绝鸣期的相关系数最高(0.59)。与年平均气温和年日照时数的相关系数

表 2 主要气候因子与蚱蝉物候期的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between meteorological factors and phenological phases of the *Cryptotympana atrata*

气候因子	始鸣期	绝鸣期	间隔期
T_{10}		-0.50**	-0.42*
R_5	0.37*		
S_6	-0.38*	0.31	0.42*
S_8	-0.46**	0.21	0.38*
S_9		0.49**	0.53**
S_{10}		0.44**	0.39*
W_7		-0.41*	-0.30
W_8		-0.57**	-0.47**
W_9		-0.40*	-0.28
W_{10}		-0.38*	-0.29
T_{6-10}	-0.01	-0.49**	-0.41*
R_{6-10}	0.10	0	-0.04
S_{6-10}	-0.44*	0.50**	0.61**
W_{6-10}	-0.10	-0.43*	-0.32
T	0.05	-0.46**	-0.41*
R	0.21	-0.02	-0.11
S	-0.29	0.48**	0.53**
W	-0.08	-0.49**	-0.38*

注: T_i 、 R_i 、 S_i 、 W_i 表示平均气温、降水量、日照时数和平均风速当年 i 月值, 如 T_{10} 为当年 10 月, T_{6-10} 为当年 6—10 月。* 和 ** 分别表示通过了 0.05 和 0.01 的显著性水平检验。

分别为 -0.47 和 0.55。蟋蟀的间隔期与气温和降水有显著的负相关关系, 与日照时数呈正相关关系。在多个气候因子中, 5—11 月平均气温与间隔期呈极显著相关, 高达 -0.58, 与 5—11 月日照时数相关系数为 0.46。作为对全球气候变暖的响应, 青岛地区气温升高、日照时数减少, 两者对蟋蟀绝鸣期的提前 (图 3e) 和间隔期的缩短 (图 3f) 都是正贡献, 对蟋蟀物候期影响最大。本文的结果与翟贵明等^[15] 研究山东省惠民县蟋蟀的物候变化结果一致。

由表 4 可知, 青蛙的始鸣期与 4—10 月平均气温和年平均气温呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.38 和 0.35。与 4—10 月日照时数和年日照时数呈负相关关系, 相关系数分别为 -0.35

表 3 主要气候因子与蟋蟀物候期的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between meteorological factors and phenological phases of the cricket

气候因子	始鸣期	绝鸣期	间隔期
T_6	0.32		-0.31
T_8		-0.34	-0.36*
T_9		-0.34	-0.38*
T_{10}		-0.53**	-0.35*
R_7			0.19
R_8			-0.46**
S_7	-0.22		0.29
S_8	-0.39*		0.45**
S_9		0.57**	0.25
S_{10}		0.47**	0.40*
T_{5-11}	0.46**	-0.57**	-0.58**
R_{5-11}	0.18	-0.04	-0.16
S_{5-11}	-0.29	0.59**	0.46**
W_{5-11}	-0.03	-0.28	-0.08
T	0.37*	-0.47**	-0.47**
R	0.20	-0.05	-0.17
S	-0.17	0.55**	0.35*
W	-0.01	-0.34	-0.13

注: 同表 2。

和 -0.41, 均通过 0.05 的显著性检验。青蛙绝鸣期与青岛地区 10 月降水、9—10 月各月风速以及年平均气温和风速呈负相关关系, 其中与年平均风速相关系数高达 -0.59。青蛙的绝鸣期与日照时数呈正相关关系, 其中与 10 月日照时数相关关系最好, 相关系数高达 0.50。青蛙间隔期与气温、日照时数、风速均有较好的相关性, 其中与 8 月风速相关性最好, 相关系数为 -0.59, 其次为 4—10 月平均气温和年日照时数。受气候变暖的影响, 青岛地区风速明显减弱, 有利于青蛙绝鸣期的推迟和间隔期的延长, 但同时气温的升高和日照时数的减少, 有利于青蛙绝鸣期的提前和间隔期的缩短。因此在多种气候因子的综合影响下, 青蛙绝鸣期和间隔期分别表现为不断提前和缩短的趋

表4 主要气候因子与青蛙物候期的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between meteorological factors and phenological phases of the frog

气候因子	始鸣期	绝鸣期	间隔期
T_8			-0.42*
T_{10}		-0.29	-0.50**
R_6			0.35*
R_{10}		-0.39*	-0.08
S_9		0.28	0.49**
S_{10}		0.50**	0.50**
W_4	0.23		-0.47**
W_5	0.26		-0.55**
W_7			-0.40*
W_8			-0.59**
W_9		-0.44*	-0.41*
W_{10}		-0.49**	-0.40*
T_{4-10}	0.38*	-0.46**	-0.55**
R_{4-10}	-0.08	-0.10	-0.01
S_{4-10}	-0.35*	0.48**	0.54**
W_{4-10}	0.20	-0.56**	-0.49**
T	0.35*	-0.45**	-0.53**
R	-0.11	-0.09	0.02
S	-0.41*	0.43*	0.55**
W	0.23	-0.59**	-0.53**

注：同表2。

表5 主要气候因子与家燕物候期的相关系数
Table 5 Correlation coefficients between meteorological factors and phenological phases of the *Hirundo rustica*

气候因子	始鸣期	绝鸣期	间隔期
T_{10}		-0.31	-0.41*
S_4	-0.36*		0.26
S_7			0.38*
S_9		0.47**	0.54**
S_{10}		0.22	0.39*
W_4	0.38*		-0.39*
W_5	0.26		-0.40*
W_6			-0.35*
W_7			-0.40*
W_8			-0.51**
W_9		-0.40*	-0.38*
W_{10}		-0.40*	-0.39*
T_{4-10}	0.28	-0.23	-0.29
R_{4-10}	-0.13	0.01	0.07
S_{4-10}	-0.61**	0.27	0.49**
W_{4-10}	0.32	-0.42*	-0.44*
T	0.23	-0.19	-0.24
R	-0.17	0.06	0.12
S	-0.55**	0.31	0.48**
W	0.38*	-0.46**	-0.49**

注：同表2。

势。从而可知动物物候期的改变是气候因子共同作用的结果^[15]。

1986—2016年期间，青岛地区家燕一般在4月和5月开始出现，4月日照时数和平均风速的变化与家燕始鸣期显著相关。在各气候因子中，4—10月平均日照时数与家燕始鸣期呈极显著相关，高达-0.61。青岛地区家燕一般在9月和10月飞往南方，家燕的绝鸣期与9月份日照时数的相关系数为0.47，与9月和10月平均风速的相关系数都为-0.40。此外与4—10月平均风速和年平均风速的相关系数分别为-0.42和-0.46。间隔期由始鸣期和绝鸣期决定，因此家燕的间隔期与气温、日照、风速均有较好的相关性，其中与9月

的日照时数和8月风速呈极显著相关，相关系数分别为0.54和-0.51。综合以上分析可知，日照时数尤其是4—10月的日照时数对青岛地区家燕的物候期变化影响最大，其次是风速变化。家燕的物候变化与气温的相关性不大。受气候变暖的影响，青岛地区日照时数显著减少，平均风速明显减弱，使家燕的始鸣期推迟，绝鸣期提前，从而导致家燕在青岛的停留期明显缩短。作为对全球气候变化的响应，青岛地区家燕的这种物候变化特征与呼和浩特市^[23]家燕的变化特征一致。而黄梅丽等^[21]的研究指出桂林地区家燕的始鸣期和绝鸣期均表现为推迟趋势，且其停留期延长。可知，由于南北方地域差异，同一物种响应气候变暖的

方向和强度会存在明显的地域差异^[11]。

4 结论和讨论

采用青岛地区气候和物候观测资料, 分析了青岛地区气温、降水、日照、风速的气候趋势变化特征。为了全面了解和对比不同种类动物物候期变化与气候变化的关系, 分别采用了昆虫(蚱蝉和蟋蟀)、两栖类动物(青蛙)、候鸟(家燕)的物候期包括始鸣期、绝鸣期和始绝鸣间隔期观测资料进行对比分析研究。1986—2016年青岛地区蚱蝉、蟋蟀、青蛙、家燕的平均始鸣期分别为6月25日(夏季)、6月24日(夏季)、4月26日(春季)、4月19日(春季), 平均绝鸣期都在秋季, 分别为9月22日、10月13日、9月25日、10月2日, 始绝鸣间隔期分别为89 d、112 d、153 d、166 d。昆虫的始鸣期一般出现在夏季的6月下旬, 而候鸟和两栖类动物的始鸣期一般出现在春季的4月中下旬, 但它们都在深秋来临前绝鸣, 候鸟和两栖类动物的始绝鸣间隔期比昆虫长。1986—2016年青岛地区蚱蝉始鸣期表现为小幅波动变化, 蟋蟀的始鸣期则先显著推迟后显著提前的变化趋势, 两者绝鸣期均呈显著提前的趋势, 因此近31年来蚱蝉和蟋蟀的间隔期表现为显著的缩短趋势。家燕和青蛙的始鸣期均有显著推迟的趋势, 而绝鸣期反而表现为极显著的提前趋势, 因此家燕和青蛙在青岛地区的间隔期/停留期逐年缩短。

在气候变暖的大背景影响下, 青岛年平均和四季平均气温也呈显著的上升趋势, 虽然蚱蝉和家燕的物候期并未对此做出响应, 但在一定程度上影响了蟋蟀和青蛙绝鸣期的提前和间隔期的缩短。近几十年青岛降水并未发生显著的增多或减少趋势, 除蚱蝉成虫交尾期与5月份降水有一定的正相关关系外(表2), 其他动物对降水的敏感度较低。受全球气候变暖的影响, 青岛地区夏、秋、冬季和年日照时数显著减少, 青岛地区蚱蝉、蟋蟀、青蛙和家燕物候期对日照时数的变化有极大的响应, 表现为绝鸣期均提前、间隔期均缩短。

平均风速的减弱也是全球变暖后的一个普遍现象, 青岛地区也不例外, 青岛地区风速减弱变化与蚱蝉、家燕绝鸣期的提前和间隔期的缩短有很好的负相关关系。然而青岛地区风速的明显减弱反而有利于青蛙绝鸣期的推迟和间隔期的延长, 但同时气温和日照的变化有利于青蛙绝鸣期的提前和间隔期的缩短, 在3个气候因子的共同影响下, 青蛙绝鸣期和间隔期分别表现为不断提前和缩短的趋势。总而言之, 动物物候期的变化是在多个气候因子共同影响下产生的, 不同物种对同一气候因子的响应强度和方向也有不同。蚱蝉和蟋蟀间隔期的缩短在一定程度上减少了对农田、果园、园林的破坏, 然而青蛙、家燕间隔期/停留期的缩短不利于农田、果园的生产和园林景观的保护。

本文研究的昆虫、两栖类动物和候鸟的间隔期/停留期都呈现缩短的趋势, 可能是由于当地气温、湿度、光照等条件改变后加速了昆虫各虫态的发育, 导致其迁飞期、种群高峰期提前^[13], 因此其在当地的间隔期就明显缩短。与南方地区如桂林等地动物间隔期普遍延长这一结果相反, 这表明同一物种对气候变暖的响应存在很强的地域差异性。蚱蝉和蟋蟀作为农作物、果林木主要的害虫, 与其他害虫繁衍生活的气候条件类似, 蚱蝉、蟋蟀间隔期的缩短或许在一定程度上也能反映其他昆虫间隔期的缩短, 由于赖以生存的食物减少, 作为以昆虫为食的青蛙和家燕也会相应地提前结束其在当地的活动, 从而提早进入冬眠期或迁徙至食物充沛的地方。因此除气候条件对动物物候期变化的影响之外, 动物之间食物链的制约关系在一定程度上也对物候变化有一定的影响。本文仅对观测站中3类4种动物进行了分析, 并不能全面反映当地不同种类动物的真实物候变化特征。此外, 本文对各气候因子如何通过影响动物生理特征从而影响其物候变化的分析不够深入, 在以后的工作中将会进一步加强这一方面的探讨。■

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M].

- Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535
- [2] 付晓伟, 吴孔明. 迁飞性昆虫对全球气候变化的响应 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (S1): 1-15
- [3] 任国玉, 陈峪. 全球变暖与中国极端气候事件变化 [J]. 科学, 2010, 62 (5): 30-33
- [4] Badeck F W, Bondeau A, Böttcher K, *et al.* Responses of spring phenology to climate change [J]. *New Phytologist*, 2004, 162: 295-309
- [5] Root T L, MacMynowski D P, Mastrandrea M D, *et al.* Human-modified temperatures induce species changes: joint attribution [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102: 7465-7469
- [6] 莫非, 赵鸿, 王建永, 等. 全球变化下植物物候研究的关键问题 [J]. 生态学报, 2011, 31 (9): 2593-2601
- [7] Medeiros D P W, Lopes A V, Zickel C S. Phenology of woody species in tropical coastal vegetation, northeastern, Brazil [J]. *Flora*, 2007, 202: 513-520
- [8] Rosenzweig C, Karoly D, Vicarelli M, *et al.* Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change [J]. *Nature*, 2008, 453: 353-357
- [9] 顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等. 气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (3): 767-776
- [10] 朱媛君, 郝琦, 清华, 等. 呼和浩特自然历主要物候期和物候季节变化特征及归因 [J]. 中国农业气象, 2017, 38 (1): 9-20. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2017.01.002
- [11] 王维玮, 张淑萍. 全球变暖引起的物候不匹配及生物适应机制 [J]. 生态学杂志, 2016, 35 (3): 808-814. DOI:10.13292/j.1000-4890.201603.004
- [12] Du Y, Ma C S, Zhao Q H, *et al.* Effects of heat stress on physiological and biochemical mechanisms of insects: a literature review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (4): 1565-1572
- [13] 陈瑜, 马春森. 气候变暖对昆虫影响研究进展 [J]. 生态学报, 2010, 30 (8): 2159-2172
- [14] 韩小梅, 申双和, 刘荣花. 气候变暖对河南省蚱蝉的影响 [J]. 气候变化研究进展, 2008 (6): 342-346
- [15] 翟贵明, 李振国, 王明涛. 气候变化对动物物候的影响分析 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (18): 9652-9654, 9658
- [16] Dunn P O, Winkler D W. Climate change has affected the breeding date of tree swallows throughout North America [J]. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 1999, 266: 2487-2490
- [17] Both C, Visser M E. Adjustment to climate change is constrained by arrival date in long-distance migrant bird [J]. *Nature*, 2001, 411: 296-298
- [18] Jenni L, Kery M. Timing of autumn bird migration under climate change: advances in long-distance migrants, delays in short-distance migrants [J]. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 2003, 270: 1467-1471
- [19] IPCC. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [20] 杨丽慧, 郑有飞, 许遐祯, 等. 气候变化对两种候鸟物候期的影响初探: 以大丰市调查为例 [J]. 中国农业气象, 2010, 31 (3): 338-343
- [21] 黄梅丽, 廖雪萍, 徐圣璇, 等. 桂林动物物候对气候变化的响应分析 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (17): 10436-10438
- [22] 徐腊梅, 晋绿生, 杨景辉, 等. 新疆物候 (候鸟) 与气候因子关系分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1 (1): 45-48
- [23] 曹艳芳, 尤莉, 魏玉荣, 等. 气候条件对候鸟物候期的影响 [J]. 内蒙古气象, 2010 (6): 44-46
- [24] 张秀艳, 姚远, 王中秀. 虎林市物候观测与气候变暖的相关关系 [J]. 黑龙江气象, 2016, 33 (2): 32-33
- [25] Gibbs J P, Breisch A R. Climate warming and calling phenology of frogs near Ithaca, New York, 1900-1999 [J]. *Conservation Biology*, 2001, 15: 1175-1178
- [26] 李世忠, 谭宗琨, 夏小曼, 等. 桂北动物物候气候变暖响应 [J]. 气象科技, 2010, 38 (3): 377-382
- [27] 郭飞燕, 左卫强, 郭飞龙, 等. 伴随 IOD 型和独立型 ENSO 对山东气候年际变化的影响 [J]. 海洋气象学报, 2017, 37 (4): 34-48
- [28] 许维娜, 余万明. 农业气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 1993: 134-135
- [29] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 2004, 62 (2): 229-236
- [30] 周天录. 害虫不可有, 天敌不可无 [J]. 湖南农业, 2007 (11): 29
- [31] 李韵文, 张亚平, 王会荣, 等. 临汾气候变化对蚱蝉始鸣期的影响初探 [J]. 山西气象, 2011 (4): 33-35
- [32] 胡忠朗, 韩崇选, 施德祥, 等. 蚱蝉生物学特性及防治的研究 [J]. 林业科学, 1992, 28 (6): 510-516

Influence of climate change on the variation of animal phenophase in Qingdao area

GUO Fei-Yan^{1,2}, QI Dong-Ju^{3,2}, ZHOU Bin^{3,2}, XUE Yun-Chuan^{1,2}

1 *Qingdao Meteorology Bureau, Qingdao 266003, China*; 2 *Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China*; 3 *Jiaozhou Meteorology Bureau, Qingdao 266300, China*

Abstract: Based on the meteorological and animal phonological observations in Qingdao, the characteristics of climate and phonological changes and their relations were investigated. From 1986 to 2016, the first song days of animals in Qingdao respectively exhibit smoothly fluctuations for *Cryptotympana atratas*, first delaying and then advancing trend for crickets, and distinct delaying trend for *Hirundo rusticas* and frogs. All their last song days display a significant advancing trend, and their first-last song intervals have a remarkable shortening trend. Under the influence of global warming, the temperature rises significantly, the precipitation changes a little, but the annual sunshine durations and wind speed both present a trend of dramatic decrease during 1961–2016 in Qingdao. The decrease for sunshine durations affects phenophase the most for the four animals, which is beneficial to advancing the last song days and shortening the first-last song intervals for all, and delaying the first song days for *Hirundo rusticas*. The phenophase for crickets and frogs responds notably to the temperature rising, but not for *Cryptotympana atratas* and *Hirundo rusticas*. The decreasing wind speed helps advancing the last song days and shortening the first-last song intervals for *Cryptotympana atratas* and *Hirundo rusticas*, but is conducive to delaying the last song days and extending the first-last song intervals for frogs. Hence, the phenophase variation occurs in conjunction with several climate factors. Except for the influence from climate change, the inter-restriction of food chain among animals also plays a role in causing the phenophase variation.

Keywords: Climate change; Phenophase variation; First song; Last song; First-last song intervals