

DOI: 10.5846/stxb201904240836

侯祥, 韩宁, 封托, 张博, 陈晓宁, 王京, 常罡. 气候因素对黑线姬鼠种群动态影响的非线性效应. 生态学报, 2020, 40(14): 4836-4841.

Hou X, Han N, Feng T, Zhang B, Chen X N, Wang J, Chang G. Nonlinear effects of climate on population dynamics of *Apodemus agrarius*. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4836-4841.

气候因素对黑线姬鼠种群动态影响的非线性效应

侯 祥¹, 韩 宁¹, 封 托¹, 张 博², 陈晓宁¹, 王 京¹, 常 罡^{1,*}

¹ 陕西省动物研究所, 西安 710032

² 陕西师范大学生命科学院, 西安 710062

摘要: 受全球气候变化的影响, 气候因素与害鼠种群变化之间的关系成为害鼠防治研究中的热点问题。以西安市长安区周边分布的黑线姬鼠为研究对象, 通过标志重捕法进行种群动态监测, 掌握其种群数量的动态变化规律, 并结合非线性的统计方法广义可加模型, 对该地区 2015—2018 年黑线姬鼠种群密度和气候因素数据进行分析, 探讨该鼠种群变化与气候因素之间的关系。结果表明, 该地区黑线姬鼠种群数量总体显现为下降趋势。黑线姬鼠种群密度存在显著的正向自我调节效应 ($F_{1.00, 5.77} = 27.062, P < 0.01$), 且与上一月种群密度存在线性的正相关。当月平均温度与该鼠种群密度之间存在显著的非线性效应 ($F_{1.90, 5.77} = 4.696, P < 0.05$), 两者之间显现为钟型关系, 当温度 $< 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 两者之间显现为正相关, 黑线姬鼠种群密度随温度的升高而升高, 反之显现为负相关。当月累计降雨量与其种群密度之间也存在显著的非线性效应 ($F_{1.87, 5.77} = 3.879, P < 0.05$), 同样, 两者之间也显现为钟型关系, 当降雨量 $> 90\text{ mm}$ 时, 两者之间显现为负相关, 种群密度随降雨量的增加而降低, 反之显现为正相关。因此, 温度和降雨对黑线姬鼠种群变化具有调节作用, 低温干旱和高温多雨均不适合该鼠的繁殖与生长。

关键词: 黑线姬鼠; 气候因素; 种群动态; 非线性; 广义可加模型

Nonlinear effects of climate on population dynamics of *Apodemus agrarius*

HOU Xiang¹, HAN Ning¹, FENG Tuo¹, ZHANG Bo², CHEN Xiaoning¹, WANG Jing¹, CHANG Gang^{1,*}

¹ Shaanxi Institute of Zoology, Xi'an 710032, China

² College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract: Global climate change affects the relationship between climate factors and rodent population dynamics, which is becoming a hot issue in rodent control research. Population dynamics of *Apodemus agrarius* in Chang An District, Xi'an, were monitored using the live capture method to elucidate the patterns of change in rodent population dynamics. Generalized additive models were used to analyze the nonlinear relationship between the rodent population density and climate factors in the respective region from 2015 to 2018. The results showed that the total number of *Apodemus agrarius* population showed a trend of decline. The model results indicated that *Apodemus agrarius* population density further presented a statistically-significant positive self-regulation effect ($F_{1.00, 5.77} = 27.062, P < 0.01$). The rodent density of each month was mainly affected by that of the preceding month. The monthly average temperature affected rodent density, showing a clear bell-shape ($F_{1.90, 5.77} = 4.696, P < 0.05$), and positive and negative association at temperatures below and above $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. The monthly total precipitation also affected the rodent density, showing a clear bell-shape ($F_{1.87, 5.77} = 3.879, P < 0.05$), and negative and positive association with rodent density at precipitation levels above and below 90 mm , respectively. Therefore, temperature and precipitation influenced rodent population dynamics. Low temperature and drought

基金项目: 陕西省科学院重大科学研究专项 (2018K-04); 陕西省重点研发计划项目 (2018NY-135); 陕西省科学院科技计划项目 (2017K-11); 西安市第一次野生动物资源调查项目 (XCZX2015-0297-3)

收稿日期: 2019-04-24; 网络出版日期: 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: snow1178@snnu.edu.cn

or high temperature and abundant rainfall conditions were not suitable for rodent reproduction and growth.

Key Words: *Apodemus agrarius*; climate factors; population dynamics; nonlinear; generalized additive model

鼠害是人类面临的一个重大问题,是制约我国农业发展的重要生物灾害之一,也是多种传染性疾病的主要宿主。据全国农业技术推广服务中心统计分析;预计 2019 年全国农区鼠害在总体上呈现中等发生局部偏重趋势,全国农田鼠害发生面积约 0.28 亿 hm^2 左右。其中,0.04 亿 hm^2 为重发面积^[1]。在农作物方面,每年约 1500 万 t 的粮食及蔬菜作物因鼠害造成严重损失^[2-6]。陕西省是受肾综合征出血热危害较严重的省份之一^[7-14]。陕西省西安市也一直是出血热高发的疫区,发病主要集中在长安区、鄠邑区、周至县等^[8-9, 15-18]。

随着全球性气候变暖、干旱加剧等因素的影响,鼠害问题变的更加突出。表现出鼠害周期缩短、持续时间变长、增长势头较猛以及危害程度加大等特点^[4, 19-21]。气候因素与害鼠种群密度的关系是害鼠防治研究中的一个热点问题,适宜的气候条件能够增加害鼠种群密度,反之则降低。气候因素一般通过影响鼠类的食物、行为、繁殖率及生存环境等因素而影响鼠类种群密度,其中温度和降雨是影响鼠密度的最重要因素之一^[8, 15, 22-24]。温度主要通过影响鼠类活动、繁殖、产仔数、存活率等直接影响鼠类密度^[8, 25]。有研究发现,月平均气温和鼠密度之间呈显著正相关^[23]。而降雨可通过影响鼠类的栖息地环境、食物资源丰富度等影响鼠密度^[8, 23, 26]。也有研究发现,降雨和黑线姬鼠的种群密度之间呈显著正相关^[8]。在鼠类种群密度与气候因素之间的关系方面有大量研究,并且主要结论均为线性的效应,但气候因素对鼠类种群波动的复杂性、非线性的效应机制还不够清楚,仍需要进一步的研究。

本研究,选取西安市长安区周边分布的农田害鼠黑线姬鼠为研究对象,通过对其种群密度进行动态监测,掌握其种群数量的动态变化规律,结合非线性的统计方法,分析 2015—2018 年气候因素对该地区黑线姬鼠种群密度的影响,阐明气候因素与其种群变化之间的关系。目的在于通过探讨气候因素与黑线姬鼠种群变化之间的相互关系,为鼠害防控提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本研究分别于 2015—2018 年在西安市长安区进行。该地区处于关中平原中部,是陕西省农作物、果树、多种经济作物和多种木材及中药材的主产区。黑线姬鼠是该地区主要分布的农田鼠种。

黑线姬鼠(*Apodemus agrarius*)为广布种,主要栖息在农田、林缘等处,是陕西省农区的优势鼠种,也是农田的常见害鼠^[27]。对农作物,特别是小麦和玉米的危害较为严重。同时,黑线姬鼠传播的疾病已知近 20 余种,是陕西省肾综合征出血热最重要的疫源动物。

1.2 黑线姬鼠种群动态监测

2015—2018 年每年的 4—10 月,在实验地区采用标志重捕法对黑线姬鼠种群动态进行调查,选取农田或弃耕地设置 5 个固定样地,每月同步调查 1 次。每块样地放置活捕笼(27 cm×14 cm×14 cm) 100 个,分 4 行平行布放,每行笼距 10 m,行距 15 m 以上,以花生米为诱饵,为减少鼠类的死亡和逃离机率,18:00 布笼,次日 7:00 观察,对所有捕获到的黑线姬鼠进行标记、常规测量和记录(体重、性别)后原地释放。同时将活捕笼收回,连捕 3 d。在分析中,将体重在 18 g 以下(包含 18 g)的个体定义为未成年鼠^[28]。黑线姬鼠种群密度近似以捕获率计算,捕获率(%)=(捕鼠只数/笼总数)×100%。

1.3 气象资料

月平均气温(℃)、月平均最高气温(℃)、月平均最低气温(℃)、月降雨量(mm)(图 1)、月降雨天数(d)等数据均来自于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。采用距离该研究地区最近的气象站数据进行匹配。

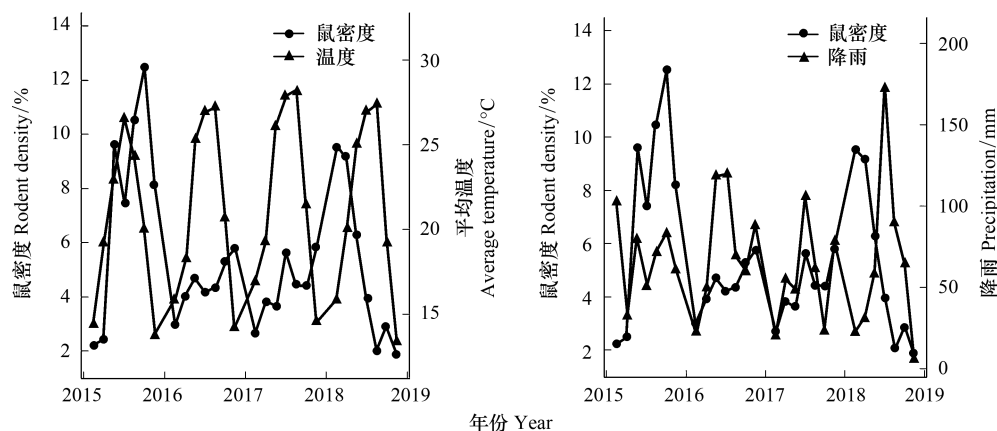


图1 2015—2018年黑线姬鼠种群密度和气候因素时间序列图

Fig.1 Monthly time series of *Apodemus agrarius* population density and climate factors from 2015 to 2018

1.4 研究方法

广义可加模型(generalized additive models, GAM)是一种非线性统计模型。采用 GAM 作为数理统计分析方法^[29-30],可以发现生物因子间,或生物因子与环境变量间的复杂非线性关系。通过数理统计模型 GAM,建立以生物因子鼠密度为相应变量的模型。气象因素存在滞后效应,本文选择滞后效应为 1 个月的气象变量^[30]。分别分析相应变量和上月鼠密度、当地气温(月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、上月平均气温、上月平均最高气温、上月平均最低气温)、降雨(月降雨量、月降雨天数、上月降雨量、上月降雨天数)的非线性关系。使用 R 软件(版本 3.3.3)、“mgcv”软件包(版本 1.8—12)^[29-30],通过交互验证的方法筛选最优模型,并且以广义交互验证指数(generalized cross validation, GCV)作为筛选参数^[29-31],GCV 值越低,模型越优。该模型的连接函数为拟泊松分布函数。模型方程如下:

$$\log(\text{Rodent}_i) = a + f_1(\log\text{Rodent}_{i-1}) + f_2(\text{Temp}_i) + f_3(\text{Prec}_i) + \varepsilon_i$$

模型中变量 Rodent_i 是 i 月调查区域的黑线姬鼠种群密度; a 为模型截距; Rodent_{i-1} 为调查区域上一月黑线姬鼠种群密度; Temp_i 表示调查区域 i 月平均气温; Prec_i 表示调查区域 i 月累计降雨量; f_1, f_2, f_3 是自然样条平滑函数; $f_1(\log\text{Rodent}_{i-1})$ 是黑线姬鼠种群密度的自相关效应; knot 设置为 3; ε_i 是随机误差项。

2 结果

2.1 黑线姬鼠种群结构及密度

调查结果显示,2015—2018 年,4 年期间共捕获黑线姬鼠 754 只。其中,雄性 426 只,雌性 328 只。2015 年共捕获 308 只,雄性 180 只,雌性 128 只,年平均鼠密度为 7.57%,年均未成年鼠占比 29.30%。2016 年共捕获 141 只,雄性 70 只,雌性 71 只,年平均鼠密度为 4.48%,年均未成年鼠占比 32.18%。2017 年共捕获 133 只,雄性 77 只,雌性 56 只,年平均鼠密度为 4.36%,年均未成年鼠占比 12.3%。2018 年共捕获 172 只,雄性 99 只,雌性 73 只,年平均鼠密度为 5.12%,年均未成年鼠占比 15.58%。

年平均鼠密度 2015 年最高,其后依次为 2018 年、2016 年和 2017 年。2015 和 2017 年黑线姬鼠种群密度呈现为先升高后下降趋势,2016 年表现为单一的上升趋势,而 2018 年表现为单一的下降趋势。黑线姬鼠种群密度存在季节性的波动,每年最高的月份一般为 6、9 和 10 月(图 1)。

2.2 GAM 分析气候因素对黑线姬鼠种群密度的影响

在 GAM 模型中,根据 GCV 值越低,模型越优的标准,选择了 GCV 最低的模型(0.606)。最优模型结果表明,黑线姬鼠种群密度与上月种群密度、当月平均温度及当月累计降雨量存在显著效应,模型的解释度达到 71.6%,实际值几乎全部落在 95%的置信区间内($R^2 = 0.656$)。该最优模型中,种群密度存在显著的正向自我

调节效应($F_{1.00, 5.77} = 27.062, P < 0.01$),与上一月种群密度存在线性的正相关。在气候因素方面,当月平均温度与种群密度之间存在显著的非线性效应($F_{1.90, 5.77} = 4.696, P < 0.05$),两者之间显现为钟型关系,当温度 < 21 °C时,两者之间显现为正相关,种群密度随温度的升高而升高,反之显现为负相关,种群密度随温度的升高而降低。当月累计降雨量与种群密度之间也存在显著的非线性效应($F_{1.87, 5.77} = 3.879, P < 0.05$),同样,两者之间也显现为钟型关系,当降雨量 > 90 mm时,两者之间显现为负相关,种群密度随降雨量的增加而降低,反之显现为正相关,种群密度随降雨量的增加而增加(图2)。

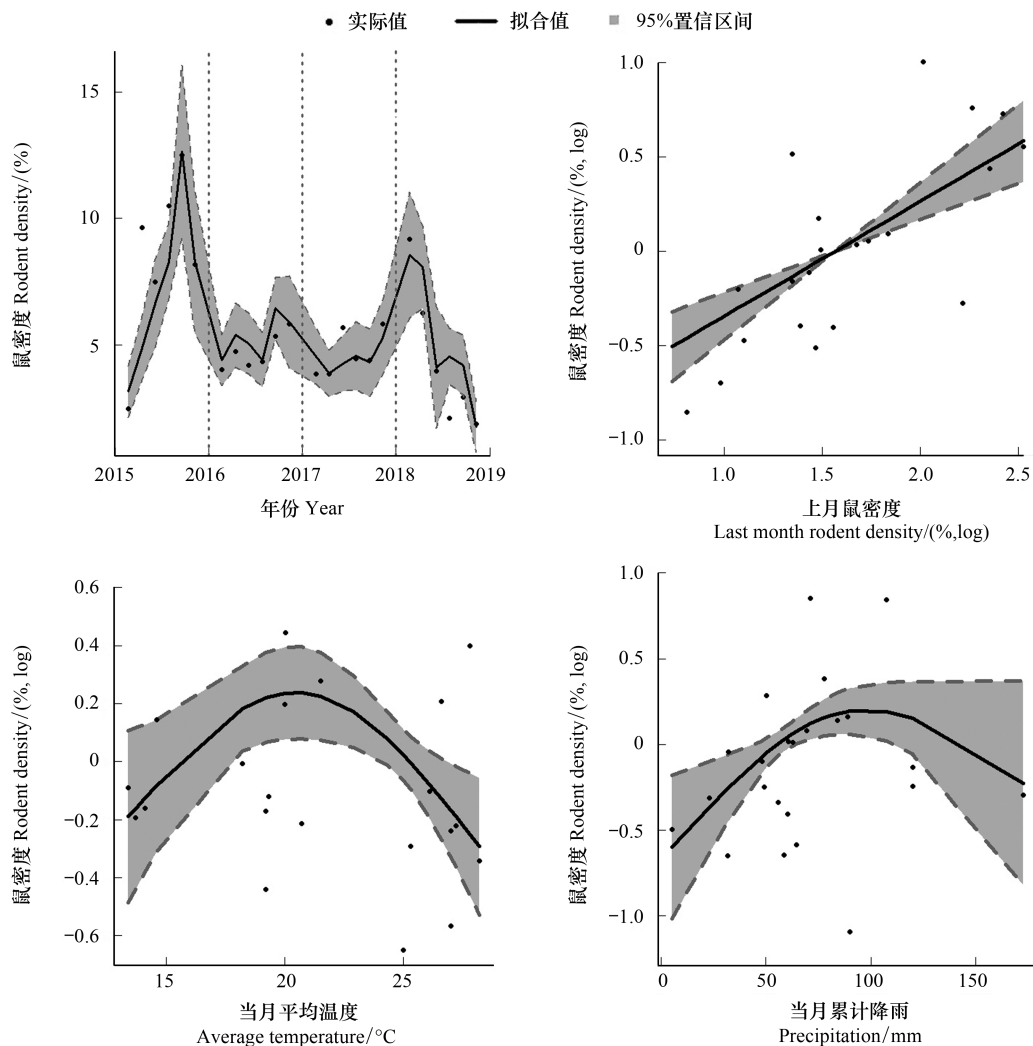


图2 广义可加模型对黑线姬鼠种群密度的分析结果

Fig.2 Analysis of *Apodemus agrarius* population density by a generalized additive model

3 讨论

本研究采用广义可加模型(GAM),分析4年间该地区黑线姬鼠种群密度与温度、降雨之间的复杂关系。结果表明种群密度存在显著的正向自我调节效应,与当月平均温度和当月累计降雨均存在显著的钟型关系。

温度主要通过影响鼠类活动、繁殖、产仔数、存活率等直接影响鼠类密度^[8, 25]。有研究发现,宁波市的月平均气温对当地害鼠密度有一定的影响,鼠密度随着温度的升高而增加,两者间显现为正相关^[23]。也有研究表明,在渭河平原冬季温度与黑线姬鼠种群密度之间存在非线性关系^[8]。在本研究中,黑线姬鼠种群密度与当月平均温度存在显著的钟型非线性关系。当地的月平均温度在13—28 °C,当温度 < 21 °C,其黑线姬鼠的种

群密度随温度的升高而升高,但当温度 $>21^{\circ}\text{C}$,温度过高导致其繁殖率受到抑制,种群密度随着温度的升高而降低。温度对鼠类的繁殖影响较大,温度过高或过低均会影响鼠类的繁殖,会起到抑制的作用。在高温时,一般情况下雌雄成年鼠不会发生交配行为,即使个别或少数雌鼠因交配受孕,也会因为温度过高而导致流产。低温不仅会抑制卵巢中卵细胞的发育,也会导致睾丸萎缩,抑制精子产生^[32]。当温度处于 $10\text{--}25^{\circ}\text{C}$ 之间,鼠类的繁殖率最高,当温度在 17°C 左右时,最适宜鼠类在户外生存活动^[33]。因此,温度过高或过低均不利于黑线姬鼠种群的发展。

有研究发现,累计年降雨量与黑线姬鼠密度之间存在显著的正相关^[8, 34]。也有研究发现,降雨量与鼠密度之间存在显著负相关^[35-36]。本研究表明,黑线姬鼠种群密度与当月降雨量之间也存在显著的钟型非线性关系。当降雨量 $>90\text{ mm}$ 时,两者之间显现为负相关,种群密度随降雨量的增加而降低,反之显现为正相关,随降雨量的增加而增加。降雨是通过影响鼠类的栖息环境、繁殖率、食物资源丰富度等影响害鼠密度^[8, 23, 26]。一方面,过量的降雨可能会破坏鼠类的栖息地环境,减少鼠类种群活动范围,降低摄食,增加死亡率,特别是暴雨,可使栖息地遭到破坏,鼠洞被淹,由于幼鼠生存能力较差,将淹死大部分幼鼠,从而对害鼠密度造成影响。另一方面,过少的降雨,将导致鼠类栖息地周边的植被遭受破坏,生长较差,造成鼠类食物条件的恶化,直接或间接导致鼠类死亡率升高。适当的降雨可以通过改善植被,增加害鼠的食物,从而有利于鼠类种群的增长^[37]。在山东省青岛市,适当的降雨可促进鼠类的繁殖^[22]。在云南省玉溪市,月降雨量通过影响鼠类的受孕情况而影响害鼠的繁殖率,月降雨量过多或过少均不利于鼠类受孕,当月降雨量 $>120\text{ mm}$ 或 $<10\text{ mm}$ 时,将降低害鼠繁殖率^[38]。因此,上述相关研究进一步解释了本研究中降雨量与黑线姬鼠种群密度之间显现为钟型关系的原因,过早或过涝均不利于其种群生长。

本研究发现2015—2018年,黑线姬鼠种群数量虽然与气候因素之间存在非线性关系,随着气候因素的波动而波动,但总体显现为下降趋势。这个结果可能是因为受到了研究地区城镇化建设的影响。近几年,西安市长安区农村城镇化建设情况较为突出,新建工业园区大面积扩张,农田和荒地不断减少,导致黑线姬鼠栖息地破碎化严重,从而影响其种群交流、食物资源丰富度、繁殖状况和生存环境的不断恶化,导致其种群数量发生变化,总体显现为下降趋势。但城镇化建设的同时,城市绿地及公园的建设也会对其栖息地的恢复起到一定的作用,其中具体的机制问题,有待进一步研究。

总而言之,研究结果表明黑线姬鼠种群密度与上月种群密度、当月平均温度、当月累计降雨量有显著的关系,当温度和降雨条件有利于鼠类生存时,本地的害鼠有可能暴发。高温多雨或低温干燥不利于黑线姬鼠的繁殖与生长。害鼠的防治需考虑多方面因素,才能做到更好的预测、预报及防治。

参考文献(References):

- [1] 全国农业技术推广服务中心. 2019年全国农区鼠害发生趋势预报. 中国植保导刊, 2019, 39(2): 40-42.
- [2] 郭永旺, 王登. 我国农村害鼠对储粮的危害及防治调查. 中国植保导刊, 2015, 35(3): 32-35.
- [3] 郭永旺, 王登, 施大钊. 我国农业鼠害发生状况及防控技术进展. 植物保护, 2013, 39(5): 62-69.
- [4] Eva J, Marta H, Ladislav C. Rodent food quality and its relation to crops and other environmental and population parameters in an agricultural landscape. Science of the Total Environment, 2016, 562: 164-169.
- [5] Jäkel T, Mouaxengcha K, Nuber U, Douangboupha B. Integrated rodent management in outbreak-prone upland rice growing areas of Northern Laos. Crop Protect, 2016, 79: 34-42.
- [6] Belmain S R, Htwe N M, Kamal N Q, Singleton G R. Estimating rodent losses to stored rice as a means to assess efficacy of rodent management. Wildlife Research, 2015, 42(2): 132-142.
- [7] Tian H Y, Hu S X, Cazelles B, Chowell G, Gao L D, Laine M, Li Y P, Yang H S, Li Y D, Yang Q Q, Tong X, Huang R, Bjornstad O N, Xiao H, Stenseth N C. Urbanization prolongs hantavirus epidemics in cities. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(18): 4707-4712.
- [8] Tian H Y, Yu P B, Cazelles B, Xu L, Tan H, Yang J, Huang S Q, Xu B, Cai J, Ma C F, Wei J, Li S, Qu J H, Laine M, Wang J J, Tong S L, Stenseth N C, Xu B. Interannual cycles of Hantaan virus outbreaks at the human-animal interface in Central China are controlled by temperature and rainfall. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(30): 8041-8046.
- [9] Tian H Y, Yu P B, Bjornstad O N, Cazelles B, Yang J, Tan H, Huang S Q, Cui Y J, Dong L, Ma C F, Ma C G, Zhou S, Laine M, Wu X X, Zhang Y Y, Wang J J, Yang R F, Stenseth N C, Xu B. Anthropogenically driven environmental changes shift the ecological dynamics of

- hemorrhagic fever with renal syndrome. *PLoS Pathogens*, 2017, 13(1): e1006198.
- [10] Xiao H, Tong X, Huang R, Gao L D, Hu S X, Li Y P, Gao H W, Zheng P, Yang H S, Huang Z Y X, Tan H, Tian H Y. Landscape and rodent community composition are associated with risk of hemorrhagic fever with renal syndrome in two cities in China, 2006—2013. *BMC Infectious Diseases*, 2018, 18: 37.
- [11] Zou L X, Chen M J, Sun L. Haemorrhagic fever with renal syndrome: literature review and distribution analysis in China. *International Journal of Infectious Diseases*, 2016, 43: 95-100.
- [12] 关鹏, 吴伟, 黄德生, 聂孝楠, 郭海强. 2004—2013 年全国肾综合征出血热时空分布特点研究. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2016, 27(2): 124-127.
- [13] 周航, 牟笛, 李昱, 陈秋兰, 殷文武, 余宏杰. 2011—2013 年中国肾综合征出血热流行特征分析. *中国地方病防治杂志*, 2015, 30(3): 166-167.
- [14] 李青华, 王利亚, 李亚楠, 孙海龙, 李申龙, 孙岩松. 2008—2012 年中国流行性出血热流行病学分析. *军事医学*, 2013, 37(12): 895-897.
- [15] Tian H Y, Yu P B, Luis A D, Bi P, Cazelles B, Laine M, Huang S Q, Ma C F, Zhou S, Wei J, Li S, Lu X L, Qu J H, Dong J H, Tong S L, Wang J J, Grenfell B, Xu B. Changes in rodent abundance and weather conditions potentially drive hemorrhagic fever with renal syndrome outbreaks in Xi'an, China, 2005-2012. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 2015, 9(3): e0003530.
- [16] Xiao D, Wu K J, Tan X, Le J, Li H T, Yan Y P, Xu Z K. Modeling and predicting hemorrhagic fever with renal syndrome trends based on meteorological factors in Hu County, China. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0123166.
- [17] 李琴丽, 蔡正华, 邢远, 李广帅, 祝睿. 2005—2014 年西安市肾综合征出血热流行特征分析. *中华地方病学杂志*, 2015, 34(8): 606-610.
- [18] 蔡正华, 李倩, 于立芬, 李琴丽, 王戡. 西安市 2000—2010 年肾综合征出血热发病趋势分析. *中国人兽共患病学报*, 2012, 28(7): 750-753.
- [19] Svensson B M, Carlsson B Å, Melillo J M. Changes in species abundance after seven years of elevated atmospheric CO₂ and warming in a Subarctic birch forest understorey, as modified by rodent and moth outbreaks. *PeerJ*, 2018, 6: e4843.
- [20] Villar C H, Naya D E. Climate change and temporal trends in body size: the case of rodents. *Oikos*, 2018, 127(8): 1186-1194.
- [21] Yan C, Xu L, Xu T Q, Cao X P, Wang F S, Wang S Q, Hao S S, Yang H F, Zhang Z B. Agricultural irrigation mediates climatic effects and density dependence in population dynamics of Chinese striped hamster in North China Plain. *Journal of Animal Ecology*, 2013, 82(2): 334-344.
- [22] Jiang F C, Wang L, Wang S, Zhu L, Dong L Y, Zhang Z T, Hao B, Yang F, Liu W B, Deng Y, Zhang Y, Ma Y J, Pan B, Han Y L, Ren H Y, Cao G W. Meteorological factors affect the epidemiology of hemorrhagic fever with renal syndrome via altering the breeding and hantavirus-carrying states of rodents and mites: a 9 years' longitudinal study. *Emerging Microbes & Infections*, 2017, 6(1): 1-9.
- [23] 王金娜, 劳家辉, 侯娟, 郭颂, 吴瑜燕, 马晓, 徐荣, 龚震宇. 气象因素对鼠密度的影响研究. *预防医学*, 2018, 30(9): 870-873, 878-878.
- [24] 吴海磊, 钱吉生, 阮治安, 黄立业, 张纯, 陈瑞, 吕永生, 许琳, 刘烈刚. 鼠密度与气象因素的响应面分析研究. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2009, 20(2): 129-132.
- [25] Ge L, Zhao Y L, Zhou K, Mu X M, Yu H B, Wang Y F, Wang N, Fan H, Guo L Q, Huo X X. Spatio-temporal pattern and influencing factors of hemorrhagic fever with renal syndrome (HFRS) in Hubei Province (China) between 2005 and 2014. *PLoS One*, 2016, 11(12): e0167836.
- [26] Xiao H, Liu H N, Gao L D, Huang C R, Li Z, Lin X L, Chen B Y, Tian H Y. Correction; investigating the effects of food available and climatic variables on the animal host density of hemorrhagic fever with renal syndrome in Changsha, China. *PLoS One*, 2013, 8(4): e61536.
- [27] 王廷正, 许文贤. 陕西啮齿动物志. 西安: 陕西师范大学出版社, 1993: 167-171.
- [28] 王岐山, 叶文虎, 谭明文, 陈家贤, 张大荣. 用体重和体长鉴定黑线姬鼠年龄方法的商榷. *兽类学报*, 1984, 4(2): 117-126.
- [29] Wood S N. Generalized Additive Models: An Introduction with R. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 2006: 100-202.
- [30] 侯祥, 刘可可, 刘小波, 常罡, 许磊, 刘起勇. 气候因素对广东省登革热流行影响的非线性效应. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2019, 30(1): 25-30.
- [31] Stige L C, Ottersen G, Brander K, Chan K S, Stenseth N C. Cod and climate: effect of the North Atlantic Oscillation on recruitment in the North Atlantic. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 325: 227-241.
- [32] 刘运喜, 李子键, 吴钦永, 杨占清. 黑线姬鼠种群数量消长与气象因子关系的多元回归分析. *数理医药学杂志*, 1998, 11(3): 197-199.
- [33] Lin H L, Zhang Z T, Lu L, Li X J, Liu Q Y. Meteorological factors are associated with hemorrhagic fever with renal syndrome in Jiaonan County, China, 2006-2011. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(6): 1031-1037.
- [34] 潘会明, 史良才, 李枝金, 李长江, 石方坤, 雷万义. 粮食产量及气候条件对农田鼠类数量变动的影响. *中国媒介生物学及控制杂志*, 1996, 7(5): 377-379.
- [35] 刘自远. 气象因素对农田鼠类数量影响的典型相关分析. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2011, 22(4): 372-374.
- [36] 闫东, 刘冠纯, 兰晓宇, 史献明, 陈永明, 崔耀仁, 王再山. 气象因素对河北省鼠疫疫源地长爪沙鼠种群密度的影响. *中华卫生杀虫药械*, 2017, 23(2): 159-161.
- [37] Brown J K M, Hovmøller M S. Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science*, 2002, 297(5581): 537-541.
- [38] 李顺德, 普文林, 沐卫东. 滇中农田褐家鼠种群繁殖规律研究. *植保技术与推广*, 1998, 18(5): 24-26.