

荒漠草原土壤动物与降雨关系研究现状*

刘任涛**

(宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要 在全球性气候变化背景下, 极端降雨事件频发, 总结土壤动物多样性与降雨变化间的关系及其响应机制, 有助于理解全球变化对土壤生态系统结构与功能的作用过程, 对于探讨陆地生态系统应对全球变化具有重要科学意义。荒漠草原生态系统极度脆弱, 对气候变化敏感, 但是关于荒漠草原土壤动物与降雨变化间关系的研究报道比较少, 严重制约了对荒漠草原生态系统的有效管理和可持续利用。本文从地上、地面和地下3个方面总结了土壤动物和降雨变化间的关系, 并就荒漠草原土壤动物应对气候变化研究提出了一些建议。研究表明, 降雨变化直接影响土壤动物群落结构; 土壤动物对降雨变化反应强烈, 不同动物类群产生了积极的响应规律; 某些土壤动物类群对于降雨变化还具有重要指示作用。在荒漠草原生态系统中, 今后需要从降雨变化对土壤动物产生的长期影响、土壤动物对降雨变化的适应方式和某些动物类群对土壤水分敏感性以及土壤动物与气候变化间的互为反馈关系等方面加强研究。

关键词 降雨变化; 土壤动物; 全球变化; 荒漠草原

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)3-0760-06

Relationships between soil fauna and rainfall change in desert steppe: A review. LIU Ren-tao** (*Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(3): 760–765.

Abstract: Under the background of global climate change, the events of extreme rainfall occur frequently. To summarize the relationships between soil faunal diversity and rainfall change and the response mechanisms of soil fauna helps understand the affecting process of global change on the structure and function of soil ecosystem, and has scientific significance in clarifying the responses of terrestrial ecosystem to global change. Desert steppe ecosystem is very fragile and sensitive to climate change, but the studies on the effects of rainfall change on the soil faunal diversity are fewer, which constrain the rational management and sustainable utilization of the ecosystem. This paper summarized the relationships between soil fauna and rainfall change from the aspects of aboveground, ground, and underground, and gave some suggestions for the future studies on the responses of soil fauna to rainfall change in desert steppe. Previous studies have showed that there is a direct effect of rainfall change on the soil faunal community structure. Soil fauna has strong response to rainfall change, and some soil faunal groups can be regarded as an important indicator for the rainfall change. It is suggested that for the desert steppe ecosystem, future studies should be focused on the long-term effect of rainfall change on soil fauna, the adaptation ways of soil fauna to rainfall change, the sensitivity of some soil faunal groups to soil water content, and the feedback relationships between soil fauna and climate change.

Key words: rainfall change; soil fauna; global change; desert steppe.

* 国家自然科学基金项目(41101050)、国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421303)、国家科技支撑项目(2011BAC07B03)和宁夏高等学校科学研究项目(NGY2011021)资助。

** 通讯作者 E-mail: liu_rt@nxu.edu.cn

收稿日期: 2011-08-24 接受日期: 2011-12-15

在全球性气候变化背景下,伴随着温室效应带来的气候变暖趋势,在一些区域降雨格局发生重大改变,结果将可能导致水资源短缺和区域不平衡加剧,年内年际间波动频繁(Peterson *et al.*, 2002; 万钢, 2008)。新一期英国《自然》杂志刊登的两份研究也认为,全球变暖导致地球降雨、降雪强度增加,洪水等自然灾害发生增多(Min *et al.*, 2011),北半球国家在未来可能会面临更多、更严重的极端降水事件(Allan, 2011)。而降雨改变以及极端降水事件的发生,将对生物个体、群落、生态系统乃至整个生物圈产生巨大的影响(Root *et al.*, 2003)。已有研究表明,在某些区域的陆地生态系统中,夏季降雨量减少导致土壤水分含量降低,直接影响到土壤生物群落(Walther *et al.*, 2002; Lindberg, 2003)。除了单个物种的丧失外,土壤生物多样性减少还影响生态系统功能或者降低其对环境干扰的抵抗力(牛书丽等, 2009)。

土壤生物群落及多样性是陆地生态系统中物种最为丰富的成分(朱永恒等, 2005),它们在全球生物多样性中具有重要价值,直接影响着陆地生态系统的稳定性(傅声雷, 2007; 殷秀琴等, 2010)。因此,在降雨变化背景下,要保护土壤生物多样性和维护生态系统的结构与功能及其稳定性,就必须弄清楚降雨变化与土壤生物多样性间的关系以及土壤生物对降雨变化的响应机制,这既是理解全球变化对土壤生物群落及其生态系统结构与功能作用过程的需要,也是探讨陆地生态系统对全球变化响应过程及其机制的重大需求。

近些年来,关于土壤动物应对降雨变化的研究,主要集中于地上土居动物如昆虫与增温(Battisti *et al.*, 2005; Kiritani, 2006; Hassall *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2009)和降雨(Masters & Brown, 2001; Morecroft *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2009)间的关系、地表土居动物生存特性(Abrahamsen, 1971)及其扩散能力(Springett *et al.*, 1970; Dunning *et al.*, 1992; Cane-puccia *et al.*, 2009)与降雨间的关系、以及地下土居动物多度分布、移动及繁殖率与干旱和增雨间的关系(Moran & Whitham, 1988; Brown & Gange, 1990; Lisbeth & Peter, 1998; Convey *et al.*, 2002; Staley *et al.*, 2007)等方面。在中国,关于土壤动物与降雨变化的研究主要集中在草地和森林生态系统(Guo *et al.*, 2009)。对于分布在中国西北地区的荒漠草原来说,降雨量年内、年际间分布极度不均,生态系统

高度脆弱,对气候变化十分敏感。但是关于荒漠草原土壤动物应对气候关系研究还较少,严重制约了我们对荒漠草原的有效管理和可持续利用。为此,本文总结了地上、地面和地下土居动物和降雨变化间关系的研究成果,分析了土壤动物与气候变化间关系的研究现状,并针对荒漠草原生态系统土壤动物应对全球变化研究的需要,提出了该地区未来关于土壤动物多样性应对气候变化的研究重点,以期为我国荒漠草原应对气候变化以及可持续发展提供科学依据。

1 不同土壤动物类群的基本生态学特征

土壤动物是指生活史的活动阶段全部或大部分在土体内或土表枯枝落叶层内度过的动物,但不包括生活史中仅仅不活动阶段(卵、蛹、休眠状态)在土壤中的动物和仅在土壤中短暂居住的脊椎动物(啮齿类、爬行类和两栖类)(曹志平, 2007)。根据其在土壤中栖息的层次可分为地上土居、地面土居和地下土居3类动物类群(张荣祖, 1998; 黄丽荣和张雪萍, 2008)。

地上土居动物指的是生活于底层植被(地表层, 苔藓层和底层草本植物)中的动物,以它们的排泄物及本身尸身与土壤发生关系,其亦偶然进入土壤(张荣祖, 1998; 黄丽荣和张雪萍, 2008)。地面土居动物指的是生活于地表,但亦在凋落物中和土壤表层孔隙中活动的动物(张荣祖, 1998; 黄丽荣和张雪萍, 2008)。地下土居动物包括真土居动物和半土居动物,其中真土居动物指的是栖息于土壤A层与B层的动物,大多能利用土壤天然孔隙和具有挖掘扩大天然孔隙的能力;半土居动物指的是生活于真土层之上的凋落物(落叶、落花、落果及落枝)层中的动物(张荣祖, 1998; 黄丽荣和张雪萍, 2008)。

地上和地下土居动物的区别主要在于食物来源的不同。其中地上土居动物区系最初的食物来源是通过光合作用形成的绿色植物(黄丽荣和张雪萍, 2008; 肖以华等, 2010)。地下土居动物区系的最初食物来源是以凋落物为主体的生物残体(肖以华等, 2010; 许湘琴等, 2011)。而生活在地面的土壤动物区系兼有地上和地下土壤动物区系成分和食性特征(黄丽荣和张雪萍, 2008; 肖以华等, 2010; 刘任涛等, 2011)。

2 地上土居动物与降雨变化的关系

对于地上土居动物而言,数量众多的昆虫是其

重要组成部分。目前关于昆虫与气候变化之间的关系开展了许多研究 (Paulson, 2001; Battisti *et al.*, 2005; Kiritani, 2006; Hassall *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2009), 主要集中于温度变化对昆虫存活率 (Battisti *et al.*, 2005)、生长和繁殖率及其分布的影响 (Kiritani, 2006; Hassall *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2009)。已有对蝴蝶与气候间关系的研究表明, 在过去 30 年中许多不列颠蝴蝶发育期提前, 而且和高峰发育期密切相关 (Roy & Sparks, 2000); 并且可以预测到, 在无其他生物体影响和土地利用变化等干扰因素情况下, 气候增温 1 °C, 许多蝴蝶种的发育期和高峰发育期可以提前 2 ~ 10 d。但是关于昆虫与降雨变化之间关系的研究比较少 (Guo *et al.*, 2009)。已有研究表明, 夏季干旱影响地上植食性无脊椎动物的多度和分布 (Masters & Brown, 2001; Morecroft *et al.*, 2002), 气候异常如降雨变化会导致昆虫种类和数量发现显著变化 (贺达汉, 1998; Guo *et al.*, 2009)。在内蒙古草原的研究结果发现, 蝗虫的滞育期和增加降雨量可以缓冲气温升高对卵发育的影响 (Guo *et al.*, 2009)。

3 地表土居动物与降雨变化的关系

对于地表土居动物而言, 由于这些土壤无脊椎动物生活在地表层而经常暴露在变化的环境中, 对气候变化 (降雨变化) 可能产生与地上和地下土居动物不同的响应与适应性特征 (Briones *et al.*, 1997; 黄丽荣和张雪萍, 2008; 肖以华等, 2010)。伴随降雨变化, 地面土壤动物的扩散能力能够有力预测这些动物类群多度分布变化特征 (Canepuccia *et al.*, 2009)。扩散能力弱的地面节肢动物 (如蚂蚁和蜘蛛) 受降雨影响较大, 而扩散能力强的地面节肢动物 (如甲虫) 受降雨影响就比较小 (Canepuccia *et al.*, 2009)。这些活动能力强的动物类群活动的范围广, 可以到其他地方获取更多的食物资源而表现出了较强的适应性 (Dunning *et al.*, 1992; 吕昭智等, 2010)。

研究表明, Enchytraeids 代表了泥炭土生境中蚯蚓群落的一种替换群落, 它在样地水分含量低于 10% 的土壤环境中并不能存活下来 (Abrahamsen, 1971), 但是它们可以向下移动到更深的土层中, 反映出一种对土壤水分变化的响应 (Springett *et al.*, 1970)。双翅目幼虫由于不能够向深层土壤中迁移而表现出对温度和水分条件变化敏感 (Briones *et*

al., 1997)。而作为苔藓垫面生境的典型定居者—水熊虫 (Tardigrades), 由于其和湿生及半水生环境紧密联系, 可以看作是一种对不利气候条件的反应敏感类群 (Briones *et al.*, 1997)。

4 地下土居动物与降雨变化的关系

气候变化对地下土居动物产生的影响没有地上和地面栖居动物反应强烈 (Bale *et al.*, 2002; Richardson *et al.*, 2002), 但是由于土壤水分含量减少, 强烈影响其取食性、产卵行为、存活及其多度大小, 因此降雨量变化对其 (包括小型和大型节肢动物) 能产生强烈的直接影响 (Brown & Gange, 1990; Staley *et al.*, 2007)。近年来, 一些学者设置了可控制性试验, 研究了气候变化 (如干旱和降雨量增加) 对土壤动物潜在影响。如在森林生态系统中, Taylor 等 (2004) 发现在云杉林中, 螨类和跳虫类总个体数并不受到水分状况的影响, 而线虫在较低的温度下具有较少的个体数量。但是 Lindberg (2003) 在挪威云杉林模拟改变降雨格局和增加土壤温度的试验中, 发现甲螨 (分解者) 和革螨 (主要普通型捕食者) 以及跳虫的物种丰度和多度在灌溉情况下增加, 而在干旱条件下减少, 并且大型节肢动物类群和线虫的多度亦在干旱条件下减少。在温带草地系统中土壤无脊椎动物类群对土壤水分含量的也具有不同响应。在英国北部, 线虫 (*Cognettia sphagnetorum*) 多度在降雨量增加情况下降低, 可能是由于土壤中水分过多而导致缺氧的缘故 (Briones *et al.*, 1997)。同样, 在南极洲这样一个极易受到气候变化影响的地区, 研究发现土壤温度升高和灌溉能够增加两个螨种和两个跳虫种的多度 (Convey *et al.*, 2002)。

关于地下土居大型节肢动物对降雨变化的响应研究发现, 许多食根性大型无脊椎动物对降雨变化引起的土壤水分含量变化而产生不同的响应特征 (Staley *et al.*, 2007), 要么是依据它们的多度与个体出现情况 (存活或繁殖率), 要么是依据它们的行为活动特点。例如, 嚼根性优势种 *Agriotes lineatus* 幼虫在夏季增雨情况下, 到秋季和来年春季出现更多的个体, 而介壳虫 (*Lecanopsis formicarum*) 多度并不受夏季降雨控制的影响 (Staley *et al.*, 2007)。食根性蚜虫 (*Pemphigus betae*) 的繁殖率、成虫个体大小和多度随着土壤水分含量降低而减少 (Moran & Whitham, 1988)。结果表明, 植食性动物幼虫对干旱的响应特征, 在于这些类群趋向于土壤深处进行

取食活动 (Moran & Whitham, 1988; Lisbeth & Peter, 1998; Staley *et al.*, 2007)。而且,土壤水分较低常常影响土壤栖居植食性动物的产卵行为,导致产卵期推迟或者把卵产在较深土层中或者几乎不产卵 (Allsopp *et al.*, 1992; Gray *et al.*, 1992; Hertl *et al.*, 2001)。

5 中国土壤动物与降雨变化关系的研究现状

目前,国内有关土壤动物对全球变化响应的研究,主要集中在草地和森林生态系统。如在内蒙古多伦开展的草原生态系统气候控制实验,是国内迄今为止规模最大的生态学多因子控制实验研究平台,包括增温、增雨、割草、施肥 4 种处理,已开展了多项物种组成、群落结构和生态系统功能等指标的测定 (牛书丽等, 2009)。于 2006 年在中国东部的南北森林样带上 (吉林长白山、北京东灵山、浙江古田山、广东鼎湖山) 建立了控制降水和氮添加的全球变化实验处理,在这些实验基础上开展了不同气候区生物对气候变化的敏感性和耐受性研究 (牛书丽等, 2009)。从 2011 年 6 月开始,宝天曼森林生态站在典型森林群落内采用人工增温和减水试验,模拟气候变暖和极端干旱情景,开展土壤生态系统对气候变化响应规律的长期观测研究 (朱学灵, 2011)。

其中,已有的研究成果大多数集中于内蒙古草原和青藏高原。在内蒙古草地,研究了模拟增温和降雨对某些蝗虫发育过程的影响,结果表明气候变暖可能使得内蒙古地区的大多数蝗虫种类分布区北移 (Guo *et al.*, 2009),而且蝗虫的滞育期和增加降雨量能够缓冲气温升高对卵发育的影响。而在青藏高原的研究表明,气温升高导致物种丰富度降低 (马瑞芳, 2007)。由此可见,随着一系列重大科研项目的开展和土壤动物应对气候变化研究的重大研究成果出现,将促进我国陆地生态系统应对全球变化的深入研究,将为未来我国适应气候变化以及实现可持续发展提供理论依据。

6 荒漠草原土壤动物与降雨变化关系的研究方向

土壤动物是荒漠草原生态系统的重要组成部分之一 (李青等, 2006; 刘任涛等, 2012),土壤动物活动可以加速初级产物在土壤中的分解过程,对土壤形成过程如土壤扰动、团聚体形成和通风等均具有重要作用 (Masters & Brown, 2001; 刘新民, 2011; 许湘琴

等, 2011),在维持该生态系统结构与功能、生态服务功能、生物多样性和食物网络结构等方面扮演着十分关键的角色 (Fu *et al.*, 2009; 殷秀琴等, 2010; 朱永恒等, 2011),并且对环境变化敏感 (Liu *et al.*, 2009; 刘继亮等, 2010)。所以,在全球气候变化背景下,研究土壤动物与降雨变化间的关系,对于荒漠草原生态系统恢复过程与稳定性维护和进行有效管理以及应对气候变化均为至关重要。

目前,关于荒漠草原土壤动物应对气候变化研究,需要重点关注以下几个方面:

1) 长期不同降水背景条件下土壤节肢动物区系的变化,包括降雨与降雪时间、强度变化导致的环境因素改变对土壤动物多样性及其功能群的长期影响。

2) 在降水变化背景下,土壤动物对不利环境的适应方式 (形态、生理、行为等)、以及其繁殖方式、食物利用等对气候变化的响应特征和适应机制。

3) 降水总变化和降水时间分布格局对土壤动物的影响,土壤动物对水的敏感性或临界阈问题,以及对气候变化具有指示功能的土壤动物类群及一些指示性特征。

4) 土壤生物多样性与气候变化关系,以及土壤生态系统与气候变化间的反馈关系,以期荒漠草原应对气候变化研究提供土壤动物学依据。

致 谢 感谢宁夏大学生命科学学院张大治副教授对文章的修改。

参考文献

- 曹志平. 2007. 土壤生态学. 北京: 化学工业出版社.
- 傅声雷. 2007. 土壤生物多样性的研究概况与发展趋势. 生物多样性, **15**(2): 109–115.
- 贺达汉. 1998. 荒漠草原蝗虫群落特征研究. 银川: 宁夏人民出版社.
- 黄丽荣, 张雪萍. 2008. 大兴安岭北部森林生态系统土壤动物的功能类群及其生态分布. 土壤通报, **39**(5): 1017–1022.
- 李 青, 吴兆录, 刘玲玲, 等. 2006. 滇西北藏区草地管理方式对草地昆虫群落多样性的影响. 生态学杂志, **25**(11): 1375–1379.
- 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 等. 2010. 黑河中游干旱荒漠地面节肢动物群落季节变异规律. 草业学报, **19**(5): 161–169.
- 刘任涛, 李学斌, 辛 明, 等. 2011. 荒漠草原地面节肢动物功能群对草地封育的响应. 应用生态学报, **22**(8):

- 2153–2159.
- 刘任涛, 李学斌, 辛 明, 等. 2012. 半干旱沙地草场地面节肢动物群落对封育措施的响应. 草业学报, **21**(1): 66–74.
- 刘新民. 2011. 内蒙古典型草原家畜粪中的粪金龟子群落特征. 生态学杂志, **30**(1): 24–29.
- 吕昭智, 钟晓英, 苏延乐, 等. 2010. 中华漠王 *Platyope proctoleuca chinensis* (鞘翅目: 拟步甲科) 对微生境的选择. 生态学杂志, **29**(11): 2199–2203.
- 马瑞芳. 2007. 内蒙古草原区近 50 年气候变化及其对草地生产力的影响 (硕士学位论文). 北京: 中国农业科学院.
- 牛书丽, 万师强, 马克平. 2009. 陆地生态系统及生物多样性对气候变化的适应与减缓. 中国科学院院刊, **24**(4): 421–427.
- 万 钢. 2008. 积极应对全球气候变化. 资源环境与发展, (1): 1.
- 肖以华, 佟富春, 杨昌腾, 等. 2010. 冰雪灾害后的粤北森林大型土壤动物功能类群. 林业科学, **46**(7): 99–105.
- 许湘琴, 林植华, 陈慧丽. 2011. 凋落物分解对土壤生物的影响. 生态学杂志, **30**(6): 1258–1264.
- 殷秀琴, 宋 博, 董炜华, 等. 2010. 我国土壤动物生态地理研究进展. 地理学报, **65**(1): 91–102.
- 张荣祖. 1998. 土壤动物研究方法手册. 北京: 中国林业出版社.
- 朱学灵. 2011. 河南宝天曼森林生态站开展林内增温减水长期试验 [EB/OL]. 中国森林生态系统定位研究网络 [2011-06-23]. <http://www.cfern.org/wldt/wldtDisplay.asp?Id=1037>.
- 朱永恒, 赵春雨, 王宗英, 等. 2005. 我国土壤动物群落生态学研究综述. 生态学杂志, **24**(12): 1477–1481.
- 朱永恒, 赵春雨, 张平究, 等. 2011. 矿区废弃地土壤动物研究进展. 生态学杂志, **30**(9): 2088–2092.
- Abrahamsen G. 1971. The influence of temperature and soil moisture on the population density of *Cognettia sphagnetorum* (Oligochaeta: Lumbricidae) in cultures with homogenized raw humus. *Pedobiologia*, **11**: 417–424.
- Allan RP. 2011. Climate change: Human influence on rainfall. *Nature*, **470**: 344–345.
- Allsopp PG, Klein MG, McCoy EL. 1992. Effect of soil moisture and soil texture on oviposition by Japanese beetle and rose chafer (Coleoptera: Scarabaeidae). *Journal of Economic Entomology*, **85**: 2194–2200.
- Bale JS, Masters GJ, Hodkinson ID, et al. 2002. Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, **8**: 1–16.
- Battisti A, Stastny M, Netherer S, et al. 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, **15**: 2084–2096.
- Briones MJ, Ineson P, Pearce TG. 1997. Effects of climate change on soil fauna: Responses of enchytraeids, Diptera larvae and tardigrades in a transplant experiment. *Applied Soil Ecology*, **6**: 117–134.
- Brown VK, Gange AC. 1990. Insect herbivory insect below ground. *Advances in Ecological Research*, **20**: 1–58.
- Canepuccia AD, Cicchino A, Escalante A, et al. 2009. Differential responses of marsh arthropods to rainfall-induced habitat loss. *Zoological Studies*, **48**: 174–183.
- Convey P, Pugh PJA, Jackson C, et al. 2002. Response of Antarctic terrestrial microarthropods to long-term climate manipulations. *Ecology*, **83**: 3130–3140.
- Dunning JB, Danielson BJ, Pulliam HR. 1992. Ecological processes that affect populations in complex landscapes. *Oikos*, **65**: 169–175.
- Fu SL, Zou XM, Coleman D. 2009. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**: 868–876.
- Gray ME, Hein GL, Boetel MA, et al. 1992. Western and northern corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae) egg densities at three soil depths: Implications for future ecological studies. *Journal of the Kansas Entomological Society*, **65**: 354–356.
- Guo K, Hao SG, Sun OJX, et al. 2009. Differential responses to warming and increased precipitation among three contrasting grasshopper species. *Global Change Biology*, **15**: 2539–2548.
- Hassall C, Thompson DJ, French GC, et al. 2007. Historical changes in the phenology of British Odonata are related to climate. *Global Change Biology*, **13**: 933–941.
- Hertl PT, Brandenburg RL, Barbercheck ME. 2001. Effect of soil moisture on ovipositional behavior in the southern mole cricket (Orthoptera: Gryllotalpidae). *Environmental Entomology*, **30**: 466–473.
- Kiritani K. 2006. Predicting impacts of global warming on population dynamics and distribution of arthropods in Japan. *Population Ecology*, **48**: 5–12.
- Lindberg N. 2003. Soil fauna and global change-responses to experimental drought, irrigation, fertilisation and soil warming (Doctoral thesis). Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Lisbeth R, Peter E. 1998. Season and soil moisture effect on movement, survival, and distribution of *Cyrtomenus bergi* (Hemiptera: Cydnidae) within the soil profile. *Environmental Entomology*, **27**: 1182–1189.
- Liu RT, Zhao HL, Zhao XY, et al. 2009. Soil macrofaunal response to sand dune conversion from mobile dunes to fixed

- dunes in Horqin sandy land, northern China. *European Journal of Soil Biology*, **45**: 417–422.
- Masters GJ, Brown VK. 2001. Effects of environmental manipulation of climate change on calcareous grassland plants and invertebrates// Green RE, Harley M, Spalding M, *et al.* eds. *Impacts of Climate Change on Wildlife*. Cambridge: The Royal Society for the Protection of Birds (RSPB).
- Min SK, Zhang XB, Zwiers FW, *et al.* 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, **470**: 378–381.
- Moran NA, Whitham TG. 1988. Population fluctuations in complex life-cycles: An example from *Pemphigus* aphids. *Ecology*, **69**: 1214–1218.
- Morecroft MD, Bealey CE, Howells O, *et al.* 2002. Effects of drought on contrasting insect and plant species in the UK in the mid-1990s. *Global Ecology and Biogeography*, **11**: 7–22.
- Paulson DR. 2001. Recent Odonata records from southern Florida: Effects of global warming? *International Journal of Odonatology*, **4**: 57–69.
- Peterson AT, Ortega-Huerta MA, Bartley J, *et al.* 2002. Future projections for Mexican faunas under climate change scenarios. *Nature*, **416**: 626–629.
- Richardson SJ, Press, MC, Parsons AN, *et al.* 2002. How do nutrients and warming impact on plant communities and their insect herbivores? A nine-year study from a sub-Arctic heath. *Journal of Ecology*, **90**: 544–556.
- Root TL, Price JT, Hall KR, *et al.* 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, **421**: 57–60.
- Roy DB, Sparks TH. 2000. Phenology of British butterflies and climate change. *Global Change Biology*, **6**: 407–416.
- Springett JA, Brittain JE, Springett BP. 1970. Vertical movement of Enchytraeidae (Oligochaeta) in moorland soils. *Oikos*, **21**: 16–21.
- Staley JT, Hodgson CJ, Mortimer SR, *et al.* 2007. Effects of summer rainfall manipulations on the abundance and vertical distribution of herbivorous soil macro-invertebrates. *European Journal of Soil Biology*, **43**: 189–198.
- Taylor ARIT, Schröter D, Pflug A, *et al.* 2004. Response of different decomposer communities to the manipulation of moisture availability: Potential effects of changing precipitation patterns. *Global Change Biology*, **10**: 1313–1324.
- Walther GR, Post E, Convey P, *et al.* 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**: 389–395.
-
- 作者简介** 刘任涛,男,1980年生,博士,助理研究员,主要从事荒漠土壤动物生态学与恢复生态学研究,发表论文20余篇。E-mail: liu_rt@nxu.edu.cn
- 责任编辑** 刘丽娟
-