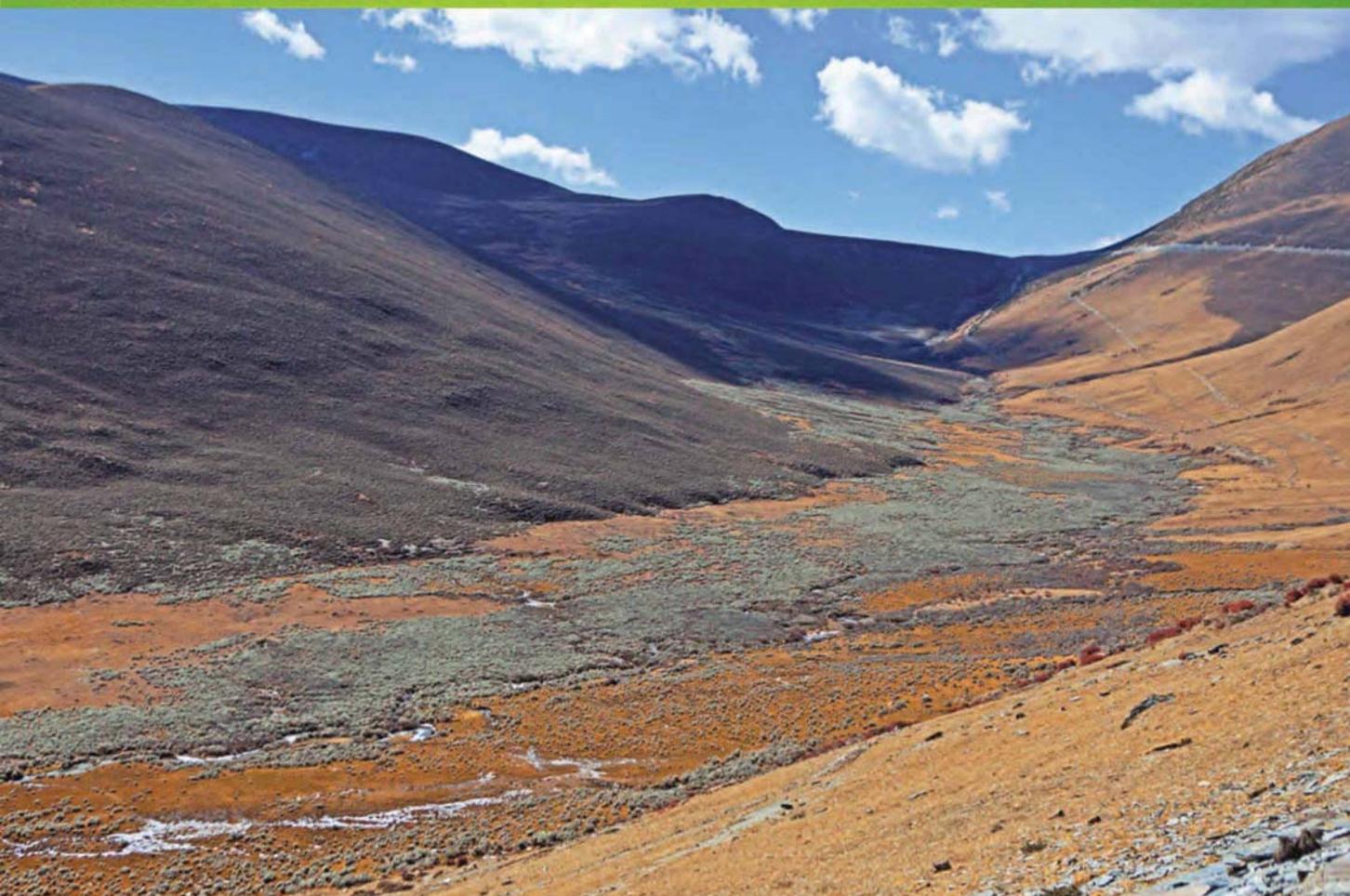


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 18 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

美国农业生态学发展综述	黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
水足迹研究进展	马 晶, 彭 建 (5458)
江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价	孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理	董 蕾, 李吉跃 (5477)
生态化学计量学特征及其应用研究进展	曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征	王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响	付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性	王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性	施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响	申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性	吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应	杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响	秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH ₃ 挥发及氮肥利用率的影响	马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
香梨两种树形净光合速率特征及影响因素	孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响	赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响	王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究	汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响	陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异	邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响	赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响	郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响	王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计	黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化	何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
干旱荒漠区银白杨树干液流动态	张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响	刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用	闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较	张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响	吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响	高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响	王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应	张雪妮,吕光辉,杨晓东,等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征.....	温远光,雷丽群,朱宏光,等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联.....	刘金福,朱德煌,兰思仁,等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系.....	王文君,杨万勤,谭波,等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态.....	范跃新,杨玉盛,杨智杰,等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征	李从娟,雷加强,徐新文,等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征.....	戴年华,邵明勤,蒋丽红,等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响.....	陈纯,李思嘉,肖利娟,等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构.....	刘沙沙,贾沁贤,刘喜方,等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律.....	潘影,徐增让,余成群,等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征.....	姚昕,朱广伟,高光,等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究.....	王传辉,吴立,王心源,等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应	李正国,杨鹏,唐华俊,等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应.....	谢冬明,金国花,周杨明,等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征.....	王超,李新辉,赖子尼,等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力	贾宝全,王成,邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化	秦纪洪 王琴 孙辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例.....	周健,肖荣波,庄长伟,等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究.....	范敬龙,刘海龙,雷加强,等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析	夏富强,唐宏,杨德刚,等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例.....	魏超,叶属峰,过仲阳,等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性	梁君,徐汉祥,王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化.....	江志兵,刘晶晶,李宏亮,等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例.....	刘耕源,杨志峰,陈彬,等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例.....	徐飞,蔡体久,琚存勇,等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿.....	李惠梅,张安录,王珊,等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应.....	李春林,刘森,胡远满,等 (5952)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 514 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 59 * 2013-09



封面图说: 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地,沟谷地带由于低平且水分较充足,生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线,以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统,高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明,易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关,显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而,这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201304010573

李正国, 杨鹏, 唐华俊, 吴文斌, 陈仲新, 刘佳, 张莉, 谭杰扬, 唐鹏钦. 近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应. 生态学报, 2013, 33(18): 5818-5827.

Li Z G, Yang P, Tang H J, Wu W B, Chen Z X, Liu J, Zhang L, Tan J Y, Tang P Q. Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5818-5827.

近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势 及其对温度的时空响应

李正国^{1, 2}, 杨 鹏^{1, 2, *}, 唐华俊^{1, 2}, 吴文斌^{1, 2}, 陈仲新^{1, 2}, 刘 佳^{1, 2},
张 莉^{1, 2}, 谭杰扬^{1, 2}, 唐鹏钦^{1, 2}

(1. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 利用 1990 至 2009 期间的东北三省 46 个农业气象站的观测记录, 通过计算玉米出苗期、成熟期和生育期长度等物候期特征的年变化率 (θ), 分析了气候变化背景下东北三省玉米物候期对生长季气温条件变化的响应特征。结果表明: (1) 研究期间, 东北三省大部分地区 5 月和 9 月均温都出现了上升趋势, 温度生长期天数持续增加; (2) 在气候增温背景下, 玉米主要物候期均出现了不同程度的变化与响应, 其中出苗期表现为提前态势 ($0.02 < \theta < 0.15$ d/a)、成熟期推迟 ($0.18 < \theta < 0.38$ d/a) 和生育期长度增长 ($0.22 < \theta < 0.44$ d/a) 的趋势, 生育期长度的增加反映了为了充分利用增温带来的适宜发育期, 作物熟型从中早熟型调整为中晚熟型的适应过程; (3) 由于种植区的空间差异, 物候期的响应和变化亦体现出区域差异, 其中松嫩平原北部、吉林省中东部和辽宁省中部的响应关系较为明显。总体上, 东北三省生长季气温条件变化使作物生长期中温度适宜程度偏好, 有利于早种晚收、生育期长的玉米品种。

关键词: 玉米物候期; 气候变化; 时空响应; 东北三省

Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years

LI Zhengguo^{1, 2}, YANG Peng^{1, 2, *}, TANG Huajun^{1, 2}, WU Wenbin^{1, 2}, CHEN Zhongxin^{1, 2}, LIU Jia^{1, 2}, ZHANG Li^{1, 2}, TAN Jieyang^{1, 2}, TANG Pengqin^{1, 2}

1 Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Investigating the historical processes behind crop phenology is essential for understanding crop response and adaption for climate change. Based on the 1990—2009 crop phenophase records from 46 agricultural meteorological stations in three provinces of northeast China, the maize phenophases (including the stages of seeding, maturity and length of the growth period) were extracted. The related annual slope change rates (θ) were then calculated and used to analyze the responses to temperature changes in the maize growing seasons of Northeast China during 1990—2009. The results showed that (1) over the past 20 years, positive trends of average temperature in May (T_5) and September (T_9), as well as an extended temperature-allowing period, were found in most areas of the three provinces. (2) With this background, various changes and responses had occurred in maize phenophases. Temporal trends of advanced seeding stage ($0.02 < \theta < 0.15$ d/a), postponed harvesting stage ($0.18 < \theta < 0.38$ d/a) and extended length of the growth period ($0.22 < \theta < 0.44$ d/a) were observed. It can be inferred the adaptive action by adjusting the early/middle maturing types to middle/late maturing types has been implemented to fully utilize the prolonged growth period under climate warming. (3) In response to the rising trend

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40930101, 41201184); 农业部“948”计划项目 (2011-G6)

收稿日期: 2013-01-01; 修订日期: 2013-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangpeng@mail.caas.net.cn

of T_5 , advancing of the maize seedling stage occurred, which was most significant in the north of Songnen Plain, the middle and the east of Jilin and the middle of Liaoning. Corresponding to the rising trend of T_9 , the maize maturity stage showed a postponement trend, which was more significant in the middle and east of Jilin. In response to the extending trend of the temperature-allowing period, the maize growth period showed an overall significant extending trend. Generally, the temperature changes during the crop growth period in Northeast China resulted in better temperature conditions for maize growth—especially for early-planting, late-harvesting varieties with a longer growth period. This may benefit future maize production, especially in northern areas. The findings provided implications for improving maize responses and adaptation studies, for researchers wishing to breed higher yielding maize cultivars and for enabling maize production to cope with ongoing climate change.

Key Words: maize phenophases; climate change; spatio-temporal response; three provinces of Northeast China

农业是对气候变化最为敏感的领域之一,气候变化意味着农业气候资源与自然灾害状况的变化,势必对农业产生有利或不利的影[1-4]。气候变暖、长期干旱、以及大气二氧化碳浓度的变化已经改变了许多传统农事活动和作物物候特征,比如春季作物物候期提前[5]和播种期提前[6]。在全球变化研究的推动下,学界对全球变化下自然植被物候期的变化研究已取得了很大的进展[7],而对于作物物候期的探索则有待于更进一步深入[8]。由于作物物候期变化很可能会改变区域尺度作物产量的形成过程并最终影响到作物总产量[9-11]。因此,理解和弄清作物物候动态变化规律及其机理机制有助于农业生产农事活动的科学调整 and 有效管理,制定和完善应对气候变化的人类响应和适应对策,减小农业生产的脆弱性和不稳定性[12]。

作为我国重要的商品粮生产基地,东北地区是玉米、水稻等粮食作物的主产区,在我国粮食安全保障体系和农业生产中占有重要地位[13]。在我国面临气候变暖问题的区域中,东北地区又是增温最显著的地区之一[14]。目前已有大量关于该地区气候变化对玉米生长条件[15-16]、玉米播种期和生育期[17-18]、作物产量[19-21]以及种植格局[22-24]的影响研究,结果表明作物品种和播种期调整是适应气候变化的重要措施[25-26]。现有关于该地区玉米物候期变化的研究或仅局限于局部地区[27],或从农业气候资源变化的角度分析玉米种植分布区的气候适宜性[14, 17, 28],或通过分析玉米生长所需热量条件的时空变化探讨玉米物候期的潜在变化[29-30],而实际农业生产中由于受到社会因素及人为因素的影响,玉米实际物候期与通过气候条件模拟的物候期并不完全对应,导致物候期变化分析存在较多不确定性因素。因此,采用物候观测记录分析玉米物候期特征的变化趋势,可以进一步完善基于气象数据的玉米物候期研究,对于制定未来气候变化条件下玉米种植的适应策略尤为重要。

本文利用 1990 至 2009 期间的东北三省 46 个农业气象站的物候观测记录,在分析玉米出苗期、成熟期和生育期长度等主要物候期的变化趋势基础上,重点分析了该地区玉米物候期变化与生长季温度条件的时空响应关系。

1 研究区和数据方法

1.1 研究区概况

中国东北三省包括辽宁省、吉林省和黑龙江省,地处 $118^{\circ}53'—135^{\circ}05'E, 38^{\circ}43'—53^{\circ}33'N$ 之间。区域面积为 79.18 万 km^2 ,其中耕地面积为 26.44 万 km^2 ,约占全国耕地总面积的 16.5% [31] (图 1)。该区属寒温带、中温带湿润(半湿润)气候,大部分地区 $\geq 0^{\circ}C$ 积温为 2000—4200 $^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 活动积温为 1600—3600 $^{\circ}C$,夏季平均气温为 20—25 $^{\circ}C$,无霜期为 140—170 d,降雨量 500—800 mm,其中 60% 集中在 7—9 月 [22]。该地区主要作物包括大豆、玉米、小麦和水稻,种植结构的地域差异很大,品种熟型亦随纬度、地形变化而改变 [17]。一般认为,对于东北地区玉米而言,日平均气温稳定 $\geq 7^{\circ}C$ 初日是适宜播种期, $\geq 10^{\circ}C$ 初日和终日分别是作物生长发育的起始期和终止期 [17]。目前的相关研究显示,20 世纪 80 年代以来东北地区农业物候期特征的总体变化趋势为生长季提前(表现为 $\geq 7^{\circ}C$ 和 $\geq 10^{\circ}C$ 初日提前)、生长季长度增加、生长季内总积温增加、 $\geq 10^{\circ}C$ 积温带北移,玉米晚熟品种的种植范围北移和东扩 [14-17]。

1.2 数据来源及预处理

本文采用的气象观测数据为东北地区 90 个基本气象站(包括黑龙江省 31 个,吉林省 22 个,辽宁省 28 个,周边省市 9 个)1990—2009 年期间 5 月和 9 月平均气温(分别记为 T_5 和 T_9)。由于东北三省春玉米种子萌发生物学下限温度约为 8 $^{\circ}C$,停止生长的生物学下限温度约为 10 $^{\circ}C$,因此,定义研究区玉米的温度生长期所涉及的界限温度分别为 $\geq 8^{\circ}C$ 和 $\leq 10^{\circ}C$ 。界限温度的求算均采用 5 日滑动平均方法,空间插值操作则采用 ARCGIS 软件提供的样条内插方法,绘制生成逐年东北三省气候特征空间分布图。

本文使用的玉米物候观测资料的数据来源为国家气象局提供的中国农作物生长发育状况资料数据集,资料根据 1990—2009 年期间农业气象站上报的农业气象旬月报报文资料整理而得。研究使用了东北三省 46 个农业气象观测台站玉米物候期观测记录,涉及的数据项包括出苗期、成熟期以及生育期(定义为出苗期与成熟期之间的天数)。

1.3 趋势分析方法

本文选择趋势线分析方法分析 1990—2009 年期间东北三省主要气候特征和物候期统计项的时间变化特征。该方法可以定量评估研究期间各统计项的整体倾向程度^[33-34],能够反映研究区 20a 来主要物候期的变化趋势。其计算公式为:

$$\theta_i = \frac{n \times \sum_{j=1}^n (j \times P_{i,j}) - \sum_{j=1}^n j \times \sum_{j=1}^n P_{i,j}}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - \left(\sum_{j=1}^n j\right)^2} \quad (1)$$

式中, n 为分析时段的年数, $P_{i,j}$ 为第 i 项统计特征第 j 年的值, θ_i 为第 i 项统计特征趋势线的斜率。如果 $\theta_i > 0$, 表示所代表物候期的变化趋势是推后或延长, 反之则是提前或缩短。

与此同时, 为了进一步判断气温条件变化的趋势, 计算比较了各省在不同时段临界高温/低温的发生概率的变化。首先对所选取时段的 T_5/T_9 数据进行偏度-峰度检验, 确定所选取数据均符合正态分布, 然后分别将 1990—1999 和 2000—2009 期间的 T_5/T_9 均值和标准差代入正态分布的概率密度函数, 绘制出不同时期气温的概率密度函数图。在此基础上, 计算 1990—1999 期间发生概率等于或小于 10% 的临界高温/低温值, 并利用上述临界高温/低温值反推其在 2000—2009 期间的发生概率, 最后比较两个时段临界高温/低温发生概率的变化情况。

2 结果分析

2.1 东北三省玉米物候期的变化趋势

通过对 1990—2009 期间东北三省各农业气象站点玉米主要物候期的线性回归分析, 得到 20a 间玉米物候期变化趋势(图 2)。在此基础上, 分别计算了各省 1990—1999 与 2000—2009 期间的均值和标准差(表 1)。

2.1.1 出苗期

从玉米出苗期平均值的线性回归结果来看(图 2), 可见区域内出苗期均出现提前趋势。黑龙江省玉米出苗期最晚, 主要出现在 6 月上旬, 提前速率为 0.15 d/a; 吉林省则多分布于 5 月中下旬, 提前速率仅为 0.02 d/a; 而辽宁省则多为 5 月中上旬, 变化速率为 0.12 d/a。

从不同时段对比情况来看(表 1), 相对 1990—1999 期间, 黑龙江、吉林和辽宁省在 2000—2009 期间玉米出苗期均有不同程度的提前, 提前天数分别为 2、0.05、1 d。除辽宁省外, 黑龙江和吉林省玉米出苗期的标准差亦有不同程度减小, 说明该地区玉米出苗期年间变率在中西部区域减小, 而南部区域略微增加。

表 1 中国东北三省玉米主要物候期的均值和标准差

Table 1 Mean value and standard deviation of major maize phenophases in three provinces of Northeast China

物候期 Phenophases		省份 Provinces					
		黑龙江		吉林		辽宁	
		1990—1999	2000—2009	1990—1999	2000—2009	1990—1999	2000—2009
出苗期 Seedling stage	平均值	5/22	5/20	5/18	5/18	5/13	5/12
	标准差	5.40	3.82	4.37	3.89	4.95	5.22
成熟期 Maturity stage	平均值	9/23	9/24	9/19	9/21	9/16	9/20
	标准差	5.00	4.29	4.69	3.80	4.86	4.92
生育期长度 Growth period	平均值	124	126	125	127	125	131
	标准差	5.13	5.38	4.24	4.69	4.93	6.33

2.1.2 成熟期

从玉米成熟期平均值的线性回归结果来看(图 2), 可见玉米成熟期在东北三省出现不同程度的推迟态势。黑龙江省玉米成熟期最晚, 主要出现在 9 月下旬, 提前速率约为 0.18 d/a; 吉林省则多分布于 9 月中旬, 提前速率为 0.26 d/a; 而辽宁省则多分布于 9 月中上旬, 提前速率为 0.38 d/a。

从不同时段对比情况来看(表 1), 相对 1990—1999 期间, 黑龙江、吉林和辽宁省在 2000—2009 期间玉米成熟期均有不同程

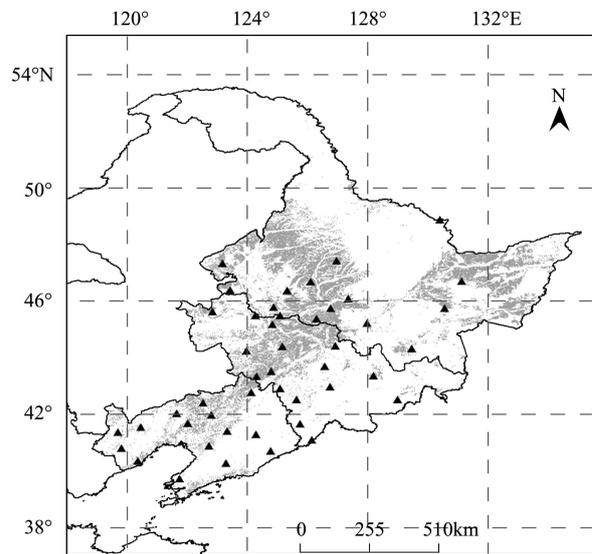


图 1 中国东北三省玉米物候观测站点位置及农业用地范围^[32]

Fig.1 Location of maize phenophase stations and spatial extent of cropland in the three provinces of Northeast China^[32]

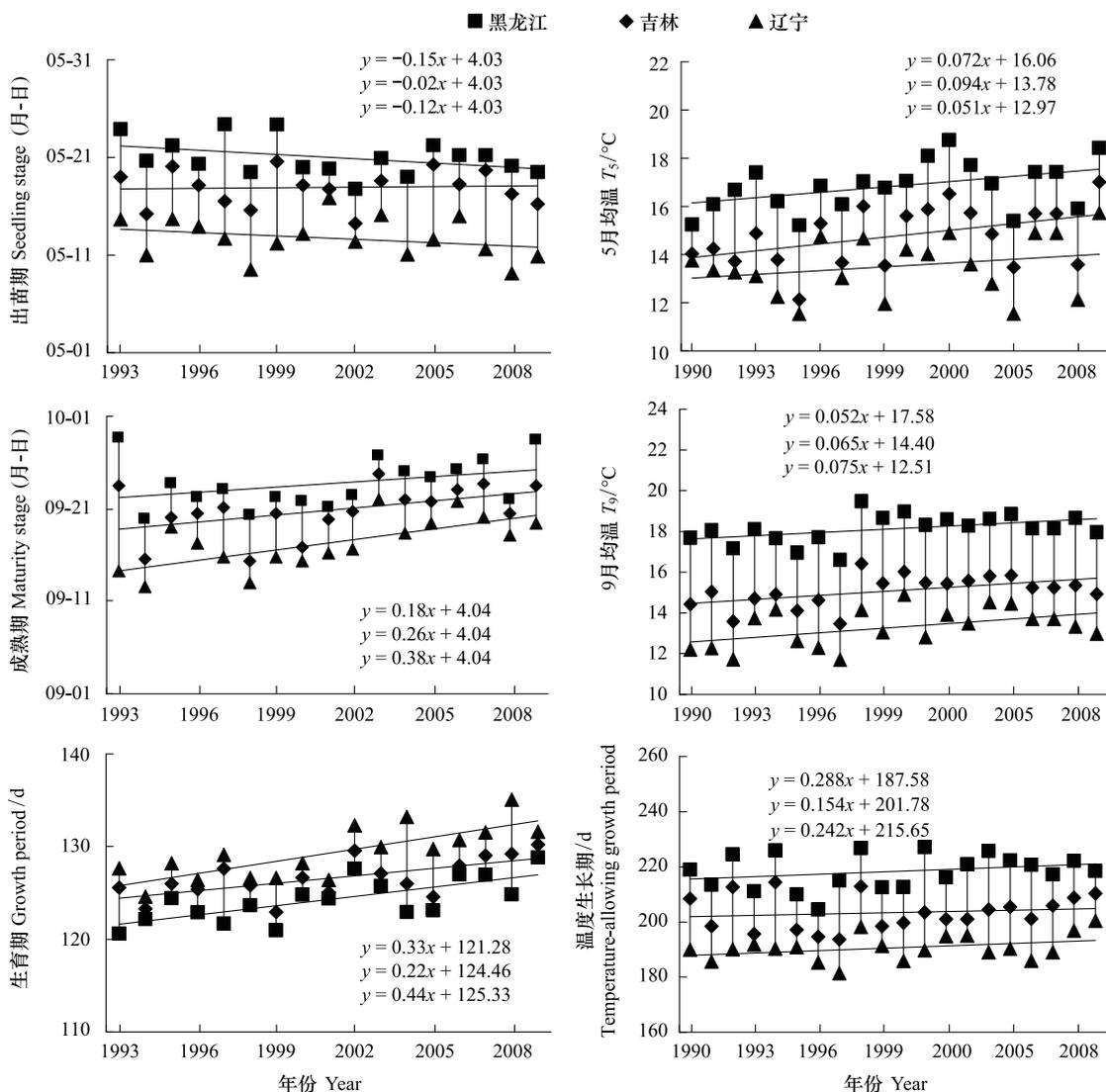


图 2 中国东北三省玉米主要物候期及气候因子的变化趋势(1990—2009)

Fig.2 Temporal trend of key phenophases of maize and climatic factors in three provinces of Northeast China (1990—2009)

度的推迟,推迟天数分别为 1 d、2 d、4 d。与成熟期标准差变化相似,除辽宁省外,黑龙江和吉林省玉米成熟期标准差亦有不同程度减小,说明该地区玉米成熟期年际间变率在中西部区域减小,而南部区域略微增加。

2.1.3 生育期长度

从玉米生育期长度平均值的线性回归结果来看(图 2),可见区域内玉米生育期长度呈增长趋势。1990—1999 期间区域内玉米生育期长度最高值多为 120—130 d 之间,而 2000—2009 期间辽宁省开始达到 130 d 以上,增长速率为 0.44 d/a;黑龙江省和吉林省的增长速率也分别达 0.33 d/a 和 0.22 d/a。从不同时段对比情况来看(表 1),玉米生育期在东北三省出现不同程度的延长,其中辽宁省的延长幅度最大,为 6 d,吉林和黑龙江次之,均为 2 d 左右。与出苗期/成熟期标准差变化不同,玉米生育期长度的年际间变率在南部区域增加较为明显,中西部区域则相对不明显。

2.2 东北三省玉米生长季气温条件的变化特征

2.2.1 5 月均温

研究统计了 1990—2009 期间各省 5 月均温的趋势变化(图 2),统计结果显示黑龙江、吉林和辽宁省的气温倾向率分别达到 0.072、0.094 和 0.051 °C/a;从不同时段对比情况来看(表 2),相对 1990—1999 期间,黑龙江、吉林和辽宁省在 2000—2009 期间 5 月均温均有不同程度的增加,增温幅度分别为 0.7、1.27、0.96 °C,同期气温标准差亦有不同程度增加,其中辽宁和黑龙江的增加幅度相对较大。

从 5 月临界气温的发生概率来看,黑龙江省 1990—1999 期间 5 月发生概率等于或小于 10%的临界气温为 11.62 °C 和 15.04 °C,以此为基准,在 2000—2009 期间出现低于 11.62 °C 的极端低温年的发生概率等于或小于 8.2%(图 3),出现高于 15.04 °C 极

端高温年的发生概率提高到 19.9%。通过计算吉林、辽宁 5 月临界气温的发生概率(图 3),结果亦显示临界高温年的发生概率增加,临界低温年的发生概率减小。总体而言,研究期间各省的春季增温相对较为显著,5 月临界低温发生概率均大幅减小,临界高温出现概率则明显上升,同时各省的气温年际变率有所增加,则体现了 5 月气温条件的不稳定性。

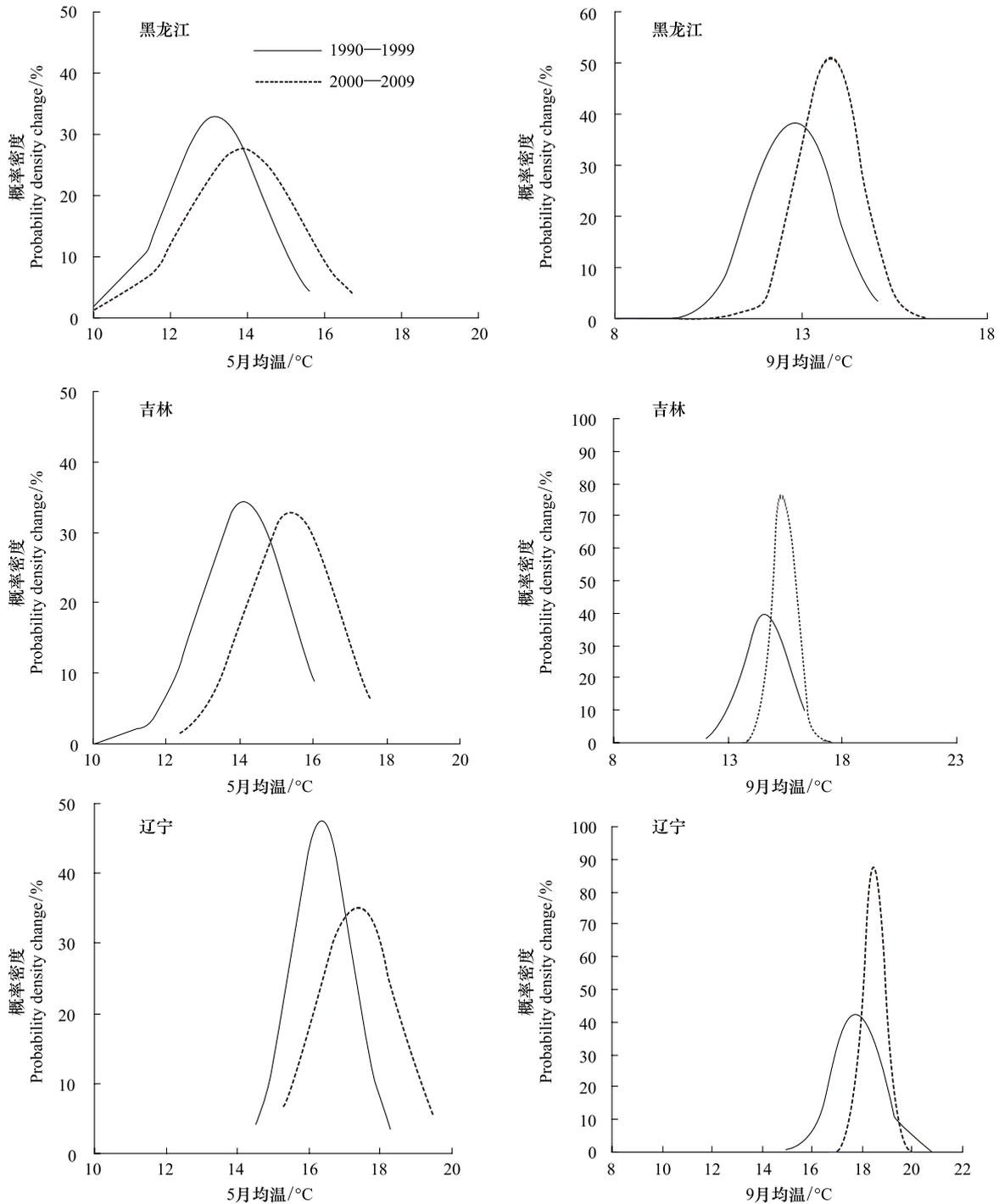


图 3 中国东北三省 5 月均温与 9 月均温的概率密度变化(1990—2009)

Fig.3 Probability density change of T_5 and T_9 in three provinces of Northeast China (1990—2009)

2.2.2 9 月均温

研究统计了 1990—2009 期间各省 9 月均温的趋势变化(图 2),统计结果显示黑龙江、吉林和辽宁省的气温倾向率分别达到 0.052、0.065 和 0.075 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$;从不同时段对比情况来看(表 2),相对 1990—1999 期间,黑龙江、吉林和辽宁省在 2000—2009 期间 9 月均温均有不同程度的增加,增温幅度分别为 0.98、0.82、0.65 $^{\circ}\text{C}$,同期气温标准差有不同程度降低,其中辽宁和吉林的减

少幅度较大。

从 9 月临界气温的发生概率来看,黑龙江省 1990—1999 期间 9 月发生概率等于或小于 10% 的临界气温为 11.49 °C 和 14.48 °C,以此为基准,在 2000—2009 期间出现低于 11.49 °C 的极端低温年的发生概率等于或小于 0.7% (图 3),出现高于 14.48 °C 极端高温年的发生概率提高到 34.2%。通过计算吉林、辽宁 9 月临界气温的发生概率分布(图 3),结果亦显示两省临界高温年的发生概率增加,临界低温年的发生概率减小。总体而言,研究期间各省的秋季增温均较为显著,9 月临界低温发生概率的均大幅减小幅度,临界高温出现概率则明显上升,同时各省的气温年际变率有所减小,体现了 9 月气温相对稳定。

2.2.3 温度生长期

研究统计了 1990—2009 期间各省温度生长期的趋势变化(图 2),统计结果显示黑龙江、吉林和辽宁省的温度生长期均有所延长的趋势,倾向率分别达到 0.29、0.15 和 0.24 d/a;从不同时段对比情况来看(表 2),相对 1990—1999 期间,黑龙江、吉林和辽宁省在 2000—2009 期间温度生长期均有不同程度的增加,增加幅度分别为 3、1 d 和 4 d。总体而言,研究期间各省的温度生长期增加均较为显著,而同期标准差则有不同程度变化,其中辽宁和吉林表现为减少态势,黑龙江则有所增加。

表 2 中国东北三省气候因子的均值和标准差

Table 2 Mean and standard deviation of climatic factors in three provinces of Northeast China

物候期 Phenophases		省份 Provinces					
		黑龙江		吉林		辽宁	
		1990—1999	2000—2009	1990—1999	2000—2009	1990—1999	2000—2009
5 月均温 T_5	平均值	13.17	13.87	14.13	15.40	16.36	17.32
	标准差	1.21	1.44	1.16	1.21	0.84	1.11
9 月均温 T_9	平均值	12.80	13.78	14.67	15.49	17.81	18.46
	标准差	1.02	0.78	1.00	0.51	0.93	0.45
温度生长期 Temperature-allowing period	平均值	189	192	203	204	216	220
	标准差	11.12	9.80	5.98	6.56	7.14	7.42

2.3 东北三省玉米物候期对气温条件的时空响应特征

2.3.1 玉米出苗期对 5 月均温的时空响应

从 1990—2009 期间玉米出苗期与 5 月均温的相关分析结果来看(图 4),两者间相关系数具有明显区域差异。其中黑龙江省的松嫩平原北部、吉林省中东部和辽宁省中部,两者之间的负相关系数多在 0.60 以上,达到了极显著水平($P < 0.01$,图 4),反映了该区域玉米出苗期对 5 月均温的上升表现为明显的提前趋势。松嫩平原西部,三江平原东部和辽宁省西部,相关系数也多在 0.40 以上,达到了显著水平($P < 0.05$),说明该区域玉米出苗期提前与 5 月均温的上升变化具有一定相关关系。黑龙江省北部、吉林省西部和辽宁省北部,两者负相关系数基本小于 0.4,未达到显著水平($P < 0.05$),表明该区域玉米出苗期由于其他环境要素的制约,对 5 月均温的上升并不敏感。

2.3.2 玉米成熟期对 9 月均温的时空响应

从 1990—2009 期间玉米成熟期与 9 月均温的相关分析结果来看(图 4),两者间相关系数具有明显区域差异。特别是吉林省中东部,两者之间的相关系数多在 0.60 以上,达到了极显著水平($P < 0.01$,图 4),反映了该区域玉米成熟期对 9 月均温的增加表现为明显的推迟趋势。辽宁省中部,相关系数也多在 0.40 以上,达到了显著水平($P < 0.05$),说明该区域玉米成熟期推迟与 9 月均温的上升变化具有一定相关关系。在东北三省的大部分区域,两者相关系数基本小于 0.4,未达到显著水平($P < 0.05$),表明大部分区域玉米成熟期由于其他环境要素的制约,对 9 月均温的上升并不敏感。

2.3.3 玉米生育期对温度生长期长度的时空响应

从 1990—2009 期间玉米生育期与温度生长期的相关分析结果来看(图 4),两者间相关系数具有明显区域差异。其中黑龙江省的三江平原东北部、吉林省中东部和松嫩平原局部,两者之间的相关系数多在 0.60 以上,达到了极显著水平($P < 0.01$,图 4),反映了该区域玉米生育期对温度生长期的增加表现为明显的提前趋势。松嫩平原西部,三江平原东部和辽宁省中部,相关系数也多在 0.40 以上,达到了显著水平($P < 0.05$),说明该区域玉米生育期延长与温度生长期的增加具有一定相关关系。黑龙江省北部、吉林省西部和辽宁省大部,两者相关系数基本小于 0.4,未达到显著水平($P < 0.05$),表明该区域玉米生育期由于其他环境要素的制约,对温度生长期的延长并不敏感。

3 讨论

本文利用近 20 年来的农业物候观测记录,通过选取具有不同农业涵义的农业气候特征和典型物候期,分析了气候变化背景下东北三省玉米物候期的变化趋势及其对生长季气温条件变化的响应特征,为制定未来气候变化情景下农业适应策略提供了科学依据。研究期间,东北三省大部分地区 5 月和 9 月均温都出现了上升趋势,温度生长期天数持续增加的趋势。这与贾建

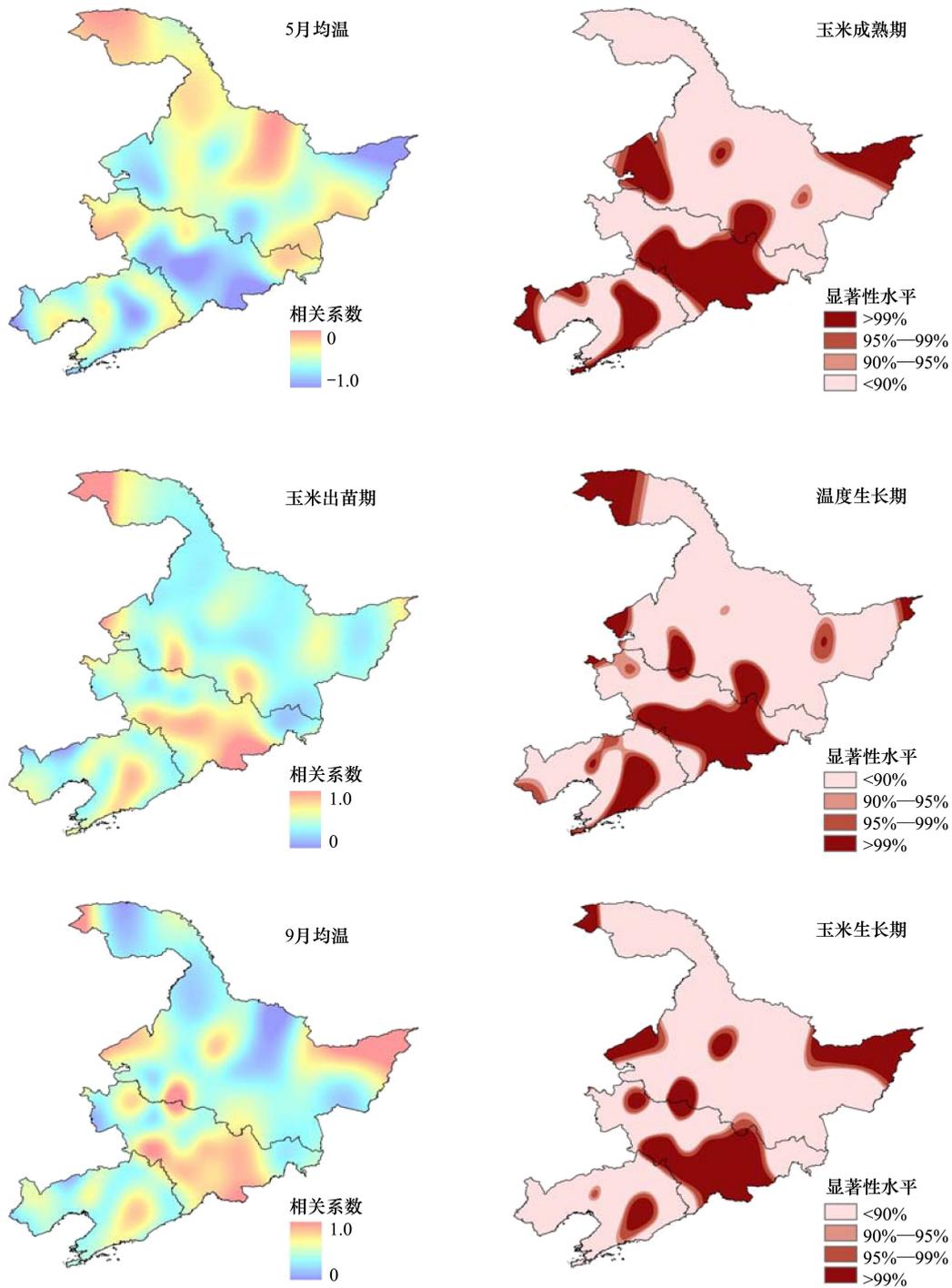


图4 中国东北三省5月均温与玉米出苗期,9月均温与玉米成熟期,温度生长期与玉米生长期的相关系数及显著性水平(1990—2009)

Fig.4 Correlation coefficients and significant levels between T_5 and maize seedling stage, between T_9 and maize maturity stage, between temperature-allowing period and maize growth period in three provinces of Northeast China (1990—2009)

英和郭建平,刘志娟等得出的东北地区农业气候资源变化分析结果基本一致^[14, 17]。农业气候资源条件的变化趋势为早种晚收、生育期长的作物品种种植提供了必要的温度条件,而同期观测记录显示区域内主要作物的物候期均出现了不同程度的变化与响应。这与吴文斌等和国志兴等认为气候变暖使得中国东北地区耕地/植被物候期在春季提前的结果基本一致^[35-36]。

本文描述了近20年来东北三省玉米典型物候特征的变化规律,但尚有许多关键点有待深入探讨。(1)考虑到区域内气候条件变化的波动性与不确定性,造成目前玉米物候期明显变化的重要原因还在于人为控制和调整。首先,研究期间区域内作物类型发生了明显空间变化^[23-24]。如松嫩平原的中西部地区 and 三江平原的部分区域水稻种植面积扩大,而春小麦种植面积出现

了明显下降。其次,作物育种和栽培方式发生了显著变化^[18, 22]。例如,玉米和水稻作为东北粮食主产区的主要栽培作物,在气候条件允许前提下,目前多通过作物育种延长生育期,特别是延长生殖生长期来提高产量,在农事活动中也都优先安排玉米和水稻的种植,大都为早种晚收;而大豆和春小麦一般都是晚种早收,以错开农事,多选用生育期短的早熟品种。由于目前农业物候观测站点尚没有记录作物类型或种植方式的变化,导致所收集的物候信息不能完全反映区域内作物物候期特征的变化情形;(2)本研究提供了直接针对玉米的物候特征变化信息,但在区分气候波动和人为品种调整造成的作物物候期变动研究方面仍有待进一步深化;(3)基于站点的农业物候观测数据无法及时全面反映区域尺度上作物生长过程对外界环境条件变化(诸如区域温度、降水和日照时间等)的时空响应,目前,基于 NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration / Advanced Very High Resolution Radiometer)^[36-37]、SPOT/VGT (Système Pour l'Observation de la Terre / Vegetation)^[38]以及 EOS/MODIS (Earth Observing System / Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)^[39-40]等中高分辨率植被指数时序资料,可以更准确地反映农作物的出苗、拔节、抽穗、收获等生育过程,适合大范围、快速监测作物的关键物候期^[41-42]。未来的作物物候期研究将在站点观测的基础上,借助植被指数拟合曲线提取作物生长季特征,从而更好地反映区域尺度上作物物候期特征的时空分异。

4 结论

在全球气候变化的背景下,物候期的变化不仅体现了作物在外界环境条件变化下的被动适应过程,也一定程度上反映了农业生产中通过作物品种的调整来应对环境变化的主动适应过程。近 20 年来的农业物候观测记录显示区域内主要作物的物候期均出现了不同程度的变化与响应。(1)与 5 月均温的增加趋势相对应,玉米出苗期出现了提前趋势,其中松嫩平原北部、吉林省中东部和辽宁省中部提前趋势较为明显;(2)与 9 月均温的增加趋势相对应,玉米成熟期出现了推迟趋势,其中吉林省中东部推迟趋势较为明显;(3)与温度生长期增加势相对应,玉米的生育期整体表现显著延长态势。总体上,东北三省生长季气温条件变化使作物生长期中温度适宜程度偏好,有利于早种晚收、生育期长的作物品种。

References:

- [1] Tang G P, Li X B, Fischer G, Prieler S. Climate change and its impacts on China's agriculture. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 129-138.
- [2] Wang Z, Zheng Y P. Impacts of global change on China's food security. *Geographical Research*, 2001, 20(3): 282-289.
- [3] Qin D H, Lou Y, Chen Z L, Ren J W, Shen Y P. Latest advances in climate change sciences: Interpretation of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(6): 311-314.
- [4] Battisti D S, Naylor R L. Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science*, 2009, 323(5911): 240-244.
- [5] Chmielewski F M, Müller A, Bruns E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961—2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 69-78.
- [6] Kaukoranta T, Hakala K. Impact of spring warming on sowing times of cereal potato and sugar beet in Finland. *Agricultural and Food Science*, 2008, 17(2): 165-176.
- [7] Wang X H, Piao S L, Ciais P, Li J S, Friedlingstein P, Koven C, Chen A P. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [8] Mo F, Zhao H, Wang J Y, Qiang S C, Zhou H, Wang S M, Xiong Y C. The key issues on plant phenology under global change. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2593-2601.
- [9] Lin E D, Xu Y L, Jiang J H, Li Y E, Yang X, Zhang J Y, Li C X, Wu S H, Zhao Z Q, Wu J G, Ju H, Yan C R, Wang S R, Liu Y F, Du B R, Zhao C Y, Qin B F, Liu C Z, Huang C Y, Zhang X Q, Ma S M. National assessment report of climate change (II): Climate change impacts and adaptation. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(2): 51-56.
- [10] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [11] Wu W B, Tang H J, Yang P, Zhou Q B, Chen Z X, Shibasaki R. Model-based assessment of food security at a global scale. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(8): 907-918.
- [12] Rosenzweig C, Parry M L. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, 1994, 367(6459): 133-138.
- [13] Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, Xu M Z, Wang Y, Tang G L, Zhai P M, Shao X M, Zhang A Y, Chen Z H, Guo J, Liu H B, Zhou J X, Zhao Z C, Zhang L, Bai H Z, Liu X F, Tang H Y. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 701-716.
- [14] Liu Z J, Yang X G, Wang W F, Li K N, Zhang X Y. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2199-2206.
- [15] Ma S Q, An G, Wang Q, Xi Z X, Liu Y Y. Study on the variation laws of the thermal resources in maize-growing belt of Northeast China. *Resources Science*, 2000, 22(5): 41-45.
- [16] Wang S L, Zhuang L W, Wang F T. Impacts of climate warming on thermal and moisture conditions in Northeast China in Recent 20 years. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2003, 14(2): 152-164.
- [17] Jia J Y, Guo J P. Studies on climatic resources change for maize over last 46 years in Northeast China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009,

- 30(3): 302-307.
- [18] Ma S Q, Wang Q, Luo X L. Effect of climate change on maize (*Zea mays*) growth and yield based on stage sowing. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2131-2139.
- [19] Gao Y G, Gu H, Ji J Z, Wang Y G. Simulation study of climate change impact on crop yield in Heilongjiang province from 1961 to 2003. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(4): 532-538.
- [20] Fang X Q, Wang Y, Xu T, Yun Y R. Contribution of climate warming to rice yield in Heilongjiang province. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 820-828.
- [21] Wang Z M, Song K S, Li X Y, Zhang B, Liu D W. Effects of climate change on yield of maize in maize zone of Songnen Plain in the past 40 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(9): 112-117.
- [22] Fang X Q, Sheng J F. Human adaptation to climate change: a case study of changes in paddy planting area in Heilongjiang province. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(3): 213-217.
- [23] Yun Y R, Fang X Q, Wang Y, Tao J D, Qiao D F. Main grain crops structural change and its climate background in Heilongjiang province during the past two decades. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 697-704.
- [24] Zhu X X, Fang X Q, Wang Y. Responses of corn and rice planting area to temperature changes based on RS in the west of Heilongjiang province. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(1): 66-71.
- [25] Jin Z Q, Ge D K, Shi C L, Gao L Z. Several strategies of food crop production in the Northeast China Plain for adaptation to global climate change: A modeling study. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 24-31.
- [26] Wang Y, Fang X Q, Xu T, Dai Y Q. Impact of climate warming and adaptation activities of rice plantation in Northeast China. *Resources Science*, 2005, 27(1): 121-127.
- [27] Li R P, Zhou G S, Shi K J, Xie Y B. Phenological characteristics of maize and their response to the climate from 1980 to 2005. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(31): 15197-15199.
- [28] Yu X F, Zhuang D F. Monitoring forest phenophases of Northeast China based on MODIS NDVI data. *Resources Science*, 2006, 28(4): 111-117.
- [29] He Q J, Zhou G S. Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12): 3931-3939.
- [30] He Q J, Zhou G S. The climatic suitability for maize cultivation in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(4): 395-403.
- [31] Shi S Q, Chen Y Q, Yao Y M, Li Z B, He Y B. Assessing natural quality and use quality of cultivated land in northeast China. *Resources Science*, 2008, 30(3): 378-384.
- [32] Li Z G, Tang H J, Yang P, Zhou Q B, Wang Y L, Wu W B, Yin H, Zhang L. Identification and application of seasonality parameters of crop growing season in northeast China based on NDVI time series data. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5): 882-892.
- [33] Guo Z X, Zhang X N, Wang Z M, Fang W H. Simulation and variation pattern of vegetation phenology in Northeast China based on remote sensing. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 165-172.
- [34] Ma M G, Wang J, Wang X M. Advance in the inter-annual variability of vegetation and its relation to climate based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3): 421-431.
- [35] Guo Z X, Zhang X N, Wang Z M, Fang W H. Responses of vegetation phenology in Northeast China to climate change. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 578-585.
- [36] Wu W B, Yang P, Tang H J, Zhou Q B, Shibasaki R, Zhang L, Tang P Q. Spatio-temporal variations in the starting dates of growing season in China's cropland over the past 20 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1777-1786.
- [37] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Ciais P, Zhu B. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672-685.
- [38] Li Z G, Yang P, Zhou Q B, Wang Y L, Wu W B, Zhang L, Zhang X F. Research on spatiotemporal pattern of crop phenological characteristics and cropping system in North China based on NDVI time series data. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6216-6226.
- [39] Zhang M W, Zhou Q B, Chen Z X, Zhou Y, Liu J, Cai C F. Crop acreage change detection based on phenology model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10): 139-144.
- [40] Peng D L, Huang J F, Jin H M. The monitoring for sequential cropping index of arable land in Zhejiang province using MODIS-NDVI. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1352-1357.
- [41] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1824-1932.
- [42] Wu W B, Yang P, Tang H J, Shibasaki R, Zhou Q B, Zhang L. Monitoring spatial patterns of cropland phenology in North China based on NOAA NDVI data. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 552-560.

参考文献:

- [1] 唐国平, 李秀彬, Fischer G, Prieler S. 气候变化对中国农业生产的影响. *地理学报*, 2000, 55(2): 129-138.
- [2] 王铮, 郑一萍. 全球变化对中国粮食安全的影响分析. *地理研究*, 2001, 20(3): 282-289.
- [3] 秦大河, 罗勇, 陈振林, 任贾文, 沈勇平. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析. *气候变化研究进展*, 2007, 3(6):

311-314.

- [8] 莫非,赵鸿,王建永,强生才,周宏,王绍明,熊友才. 全球变化下植物物候研究的关键问题. 生态学报, 2011, 31(9): 2593-2601.
- [9] 林而达,许吟隆,蒋金荷,李玉娥,杨修,张建云,李从先,吴绍洪,赵宗群,吴建国,居辉,严昌荣,王守荣,刘允芬,杜碧兰,赵成义,秦保芳,刘春葵,黄朝迎,张小全,马世铭. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51-56.
- [11] 吴文斌,唐华俊,杨鹏,周清波,陈仲新,Shibasaki R. 基于空间模型的全球粮食安全评价. 地理学报, 2010, 65(8): 907-918.
- [13] 任国玉,初子莹,周雅清,徐铭志,王颖,唐国利,翟盘茂,邵雪梅,张爱英,陈正洪,郭军,刘洪滨,周江兴,赵宗慈,张莉,白虎志,刘学峰,唐红玉. 中国气温变化研究最新进展. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701-716.
- [14] 刘志娟,杨晓光,王文峰,李克南,张晓煜. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206.
- [15] 马树庆,安刚,王琪,裘著香,刘玉英. 东北玉米带热量资源的变化规律研究. 资源科学, 2000, 22(5): 41-45.
- [16] 王石立,庄立伟,王馥棠. 近 20 年气候变暖对东北农业生产水热条件影响的研究. 应用气象学报, 2003, 14(2): 152-164.
- [17] 贾建英,郭建平. 东北地区近 46 年玉米气候资源变化研究. 中国农业气象, 2009, 30(3): 302-307.
- [18] 马树庆,王琪,罗新兰. 基于分期播种的气候变化对东北地区玉米(*Zea mays*)生长发育和产量的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 2131-2139.
- [19] 高永刚,顾红,姬菊枝,王育光. 近 43 年来黑龙江气候变化对农作物产量影响的模拟研究. 应用气象学报, 2007, 18(4): 532-538.
- [20] 方修琦,王媛,徐铤,云雅如. 近 20 年气候变暖对黑龙江省水稻增产的贡献. 地理学报, 2004, 59(6): 820-828.
- [21] 王宗明,宋开山,李晓燕,张柏,刘殿伟. 近 40 年气候变化对松嫩平原玉米带单产的影响. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 112-117.
- [22] 方修琦,盛静芬. 从黑龙江省水稻种植面积的时空变化看人类对气候变化影响的适应. 自然资源学报, 2000, 15(3): 213-217.
- [23] 云雅如,方修琦,王媛,陶军德,乔佃锋. 黑龙江省过去 20 年粮食作物种植格局变化及其气候背景. 自然资源学报, 2005, 20(5): 697-704.
- [24] 朱晓禧,方修琦,王媛. 基于遥感的黑龙江省西部水稻、玉米种植范围对温度变化的响应. 地理科学, 2008, 28(1): 66-71.
- [25] 金之庆,葛道阔,石春林,高亮之. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究. 作物学报, 2002, 28(1): 24-31.
- [26] 王媛,方修琦,徐铤,戴玉娟. 气候变暖与东北地区水稻种植的适应行为. 资源科学, 2005, 27(1): 121-127.
- [27] 李荣平,周广胜,史奎桥,谢艳兵. 1980—2005 年玉米物候特征及其对气候的响应. 安徽农业科学, 2009, 37(31): 15197-15199.
- [28] 于信芳,庄大方. 基于 MODIS-NDVI 数据的东北森林物候期监测. 资源科学, 2006, 28(4): 111-117.
- [29] 何奇瑾,周广胜. 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性. 生态学报, 2012, 32(12): 3931-3939.
- [30] 何奇瑾,周广胜. 我国玉米种植区分布的气候适宜性. 科学通报, 2012, 57(4): 267-275.
- [31] 石淑芹,陈佑启,姚艳敏,李志斌,何英彬. 东北地区耕地自然质量和利用质量评价. 资源科学, 2008, 30(3): 378-384.
- [32] 李正国,唐华俊,杨鹏,周清波,王仰麟,吴文斌,殷贺,张莉. 基于时序植被指数的东北地区耕地生长季特征识别与应用研究. 北京大学学报:自然科学版, 2011, 47(5): 882-892.
- [33] 国志兴,张晓宁,王宗明,方伟华. 东北地区植被物候期遥感模拟与变化规律. 生态学杂志, 2010, 29(1): 165-172.
- [34] 马明国,王建,王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431.
- [35] 国志兴,张晓宁,王宗明,方伟华. 东北地区植被物候对气候变化的响应. 生态学杂志, 2010, 29(3): 578-585.
- [36] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,周清波,Shibasaki R,张莉,唐鹏钦. 过去 20 年中国耕地生长季起始期的时空变化. 生态学报, 2009, 29(4): 1777-1786.
- [38] 李正国,杨鹏,周清波,王仰麟,吴文斌,张莉,张小飞. 基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征. 生态学报, 2009, 29(11): 6216-6226.
- [39] 张明伟,周清波,陈仲新,周勇,刘佳,蔡崇法. 基于物候模型的作物种植面积变化监测方法. 农业工程学报, 2006, 22(10): 139-144.
- [40] 彭代亮,黄敬峰,金辉民. 基于 MODIS-NDVI 的浙江省耕地复种指数监测. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1352-1357.
- [42] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,Shibasaki R,周清波,张莉. 基于 NDVI 数据的华北地区耕地物候空间格局. 中国农业科学, 2009, 42(2): 552-560.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Development of agroecology in USA	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae)	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i>	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO ₂ concentrations	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH ₃ volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jianguai, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar:nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i>	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i>	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi WEN Yuanguang, LEI Liqun, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元