

气候变化对北方农牧交错带界线变迁影响的 定量探测方法研究

史文娇^{1,2,3,4}, 刘奕婷^{2,3}, 石晓丽⁵

(1. 中国土地勘测规划院 国土资源部土地利用重点实验室, 北京 100035;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京

100085; 5. 河北师范大学资源与环境科学学院 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024)

摘要: 气候对北方农牧交错带界线变迁的定量影响是目前生态脆弱敏感区对气候变化响应领域的研究热点问题。前人已在气候变化对农牧交错带界线的定性影响方面有较为深刻的认识,但仍缺乏在时间和空间上对气候贡献率进行有针对性的定量辨识。本文利用1970年以来长时间序列的国家气象站点数据和土地利用遥感解译数据,分别提取了基于气候要素和土地利用的20世纪70年代、80年代、90年代和21世纪前10年4个时期的北方农牧交错带界线,通过垂直和水平方向变动探测方法(FishNet)和界线变迁方向变动探测方法(DSAS)对气候界线与土地利用界线的时空变化进行探测,定量分析了不同时期气候对农牧交错带界线变迁影响的贡献率。结果表明,气候与土地利用界线空间分布格局及气候贡献率在不同时期、不同区域差异较大,在西北地区变幅最小,东北地区变幅最大。在大兴安岭南缘农田控制水源涵养生态功能区西北段以及内蒙古高原东南缘农、林、牧业生态—生产功能区西北段,气候与土地利用界线空间耦合关系最为密切,在该地区基于FishNet方法下水平方向上气候贡献率达10.7%~44.4%,垂直方向上达4.7%~55.9%;基于DSAS方法下气候贡献率为1.1%~16.8%。两种方法探测结果大部分趋于一致,但DSAS方法精度高,适用于小范围精确探测;FishNet方法更简单,适用于精度要求不高、快速直观的统计分析。本研究可为北方农牧交错带内农牧业生产适应气候变化、合理开发土地生产潜力、保护农牧交错带区内生态环境提供科学依据和指导。

关键词: 北方农牧交错带;气候变化;土地利用;垂直和水平方向变动探测方法(FishNet方法);界线变迁方向变动探测方法(DSAS方法);定量探测

DOI: 10.11821/dlxb201703004

1 引言

农牧交错带是农业种植区与草原畜牧区的生态过渡地带^[1]。在农牧交错带中,耕地和草地在空间上交错分布,时间上相互重叠^[2]。农牧交错带界线对气候变化和人为干扰均较为敏感^[3]。中国农牧交错带分布广泛,在北方地区、西南地区、西北地区均有分布,其中

收稿日期: 2016-09-26; 修订日期: 2016-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371002, 41401113); 国土资源部土地利用重点实验室开放基金(KLLU201603); 遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201622); 中国科学院地理科学与资源研究所优秀青年人才基金项目(2016RC201) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371002, No.41401113; Open Fund of State Key Laboratory of Land Use, Ministry of Land and Resources, No.KLLU201603; Open Fund of State Key Laboratory of Remote Sensing Science, No.OFSLRSS201622; Fund for Excellent Young Talents in Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, No.2106RC201]

作者简介: 史文娇(1982-), 女, 辽宁葫芦岛人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 中国地理学会会员(S110008514M), 研究方向为全球变化与区域农业。E-mail: shiwj@reis.ac.cn

北方农牧交错带范围最广、生态问题最为突出,因而气候变化对北方农牧交错带界线变迁的影响得到了气候变化与土地利用变化等领域学者的广泛关注。

已有研究在北方农牧交错带界线划定的基础上,定性分析了其时空格局变化及气候变化对界线变迁的影响,并得出北方农牧交错带地区气候界线与土地利用界线移动趋势相反的结论^[4-5]。也有学者发现,北方农牧交错带尤其是东北地区的气候、政策和耕地开垦是一个相互作用的有机整体,它们共同主导了土地利用/土地覆被变化过程,从而引起了农牧交错带界线的变迁^[6]。随后,许多学者认识到定性研究的不足,开始定量分析气候和人类活动等不同因素对土地利用格局产生的影响^[7]。在研究方法上,主要分为两类:一是模型分析方法,如区域土地利用变化与影响模型(CLU-S模型)^[8]、面向地理过程动态环境模型(Dinamica EGO模型)^[9]等模型方法;二是数理统计分析方法,包括Logistic回归分析方法^[8]、Pearson相关分析^[10]等方法。其中,模型分析方法是土地利用/土地覆被变化的经典研究方法之一^[7],大多数相关研究结合经济模型^[11]分析自然、人为因素对农牧交错带地区土地利用变化驱动的贡献程度,并对未来土地利用变化情况进行预测,但模型分析方法存在针对不同地区参数获取困难、计算复杂、精度验证标准不一的问题。数理统计方法计算较为简单,但大多分析某个特定因子如降水、气温等对农牧交错带内土地利用格局变化的驱动情况,少有对气候影响的综合分析,且大多选取整体研究区内指标平均值的时间序列进行分析^[8],不能全面、客观地反映实际情况。从研究尺度上来看,主要集中在点^[4, 12]、面尺度上^[13-14],但在线尺度上尚未提出有效方法对气候变化对农牧交错带界线变迁的贡献程度做出较为清晰、有针对性且定量化的辨识^[3-4]。

本文基于对北方农牧交错带气候界线和土地利用界线的刻画,在地理信息系统渔网功能(FishNet)和数字化海岸带界线变动探测方法(DSAS)的基础上^[15-16],进一步提出了适用于1 km精细尺度的定量化不同时间阶段和生态功能区的气候变化对农牧交错带界线变迁贡献程度的两种方法,实现了精细尺度的水平、垂直和界线变动方向上的气候界线与土地利用界线变迁程度探测,科学厘定了气候驱动农牧交错带界线变迁的贡献程度。同时,根据两种方法得到的研究结果进行对比,分析两种方法的优缺点及各自适用条件,以期帮助制定和采取适当的土地利用政策和措施,合理开发北方农牧交错区的农业生产潜力,避免气候不适宜区域的农垦活动,对更好地适应气候变化、保护耕地资源和区域生态环境具有重要的现实意义。

2 研究数据与方法

2.1 研究区概况

中国北方农牧交错带(34°16'N~48°57'N, 102°40'E~126°14'E)位于大兴安岭东南缘、内蒙古高原南缘和黄土高原北部,同时有小部分位于河西走廊地区,包含内蒙古、宁夏、黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、甘肃等省、自治区的百余个县、市、旗,总面积约61.4万km²。区域内气候属于典型温带半干旱大陆性季风气候,年均温0~10℃左右,年降水量300~500 mm,年际降水变化大、蒸发强烈;地形较为复杂,海拔多在1000 m以上;耕地、草地与林地交错分布,西北界紧邻牧区,草地比例较高,东南界靠近农区,耕地比例较高;自西向东植被类型由森林草原带过渡到典型草原带和荒漠草原带,是典型的干草原植被类型;在过去近40年中,东南地区经济发展较快、人口增长迅速,大量土地被开垦,该区域的农牧交错带界线受人为干扰较大。由于北方农牧交错带区域内存在以上自然条件和人为干扰上的差异,为了得到更有针对性的结论,在黄

青等^[17]对北方农牧交错带内生态功能区划分的基础上, 对各区外侧做缓冲区至包含全部北方农牧交错带地区, 分别命名为大兴安岭东南缘农田控制水源涵养生态功能(1区)、内蒙古高原东南缘农、林、牧业生态—生产功能区(2区)、黄土高原北部农牧交错水土保持生态功能区(3区)以及河西走廊干旱荒漠绿洲农业生态功能区(4区), 并根据20世纪70年代以来400 mm等降水线平均位置的走势将每类生态功能区均划分成西北段(NW)和东南段(SE), 划分区域具体情况如表1所示, 空间分布如图1所示。

表1 北方农牧交错带地区生态功能区划分
Tab. 1 Ecological function regions in farming-pastoral ecotone of northern China

简称	生态功能区名称	主要生态服务功能
NW-1	大兴安岭东南缘农田控制水源涵养生态功能区西北段	农牧业生产/林果业生产/ 沙漠化控制/生态旅游
SE-1	大兴安岭东南缘农田控制水源涵养生态功能区东南段	
NW-2	内蒙古高原东南缘农、林、牧业生态—生产功能区西北段	农牧业生产/沙漠化控制
SE-2	内蒙古高原东南缘农、林、牧业生态—生产功能区东南段	
NW-3	黄土高原北部农牧交错水土保持生态功能区西北段	水土保持/农林产品生产
SE-3	黄土高原北部农牧交错水土保持生态功能区东南段	
NW-4	河西走廊干旱荒漠绿洲农业生态功能区西北段	沙漠化控制/农业生产
SE-4	河西走廊干旱荒漠绿洲农业生态功能区东南段	

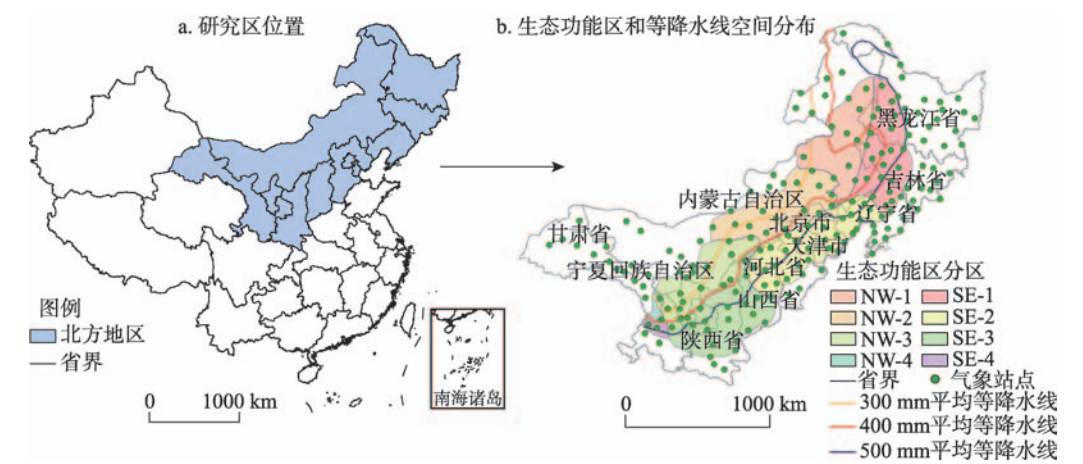


图1 中国北方农牧交错带生态功能区 and 等降水线空间分布
Fig. 1 The distributions of ecological function regions and isohyets in farming pastoral ecotone of northern China

2.2 数据

2.2.1 气象数据 本文气象数据来自北方地区197个国家气象站点(图1)1970-2010年的日值气温和降水数据。其中日值气温数据来源于序列均一性的多元分析方法(MASH)软件包处理得到全国均一化日气温数据集^[18], 该时间序列数据有效地避免了观测时间、观测仪器等引起的偏差。基于以上数据集, 使用ANUSPLIN软件进行气象数据空间插值, 得到研究区内空间分辨率为1 km的各类气象指标的栅格数据。

2.2.2 土地利用数据 为了研究北方农牧交错带地区近40年内的土地利用变化情况, 本文应用了中国北方地区20世纪70年代、80年代、90年代和21世纪前10年的1 km土地利用百分比栅格数据, 数据来源于国家土地利用/土地覆被数据集(NLCD)^[19-21]。NLCD数据集使用了Landsat TM/ETM/MSS影像以及CBERS-1、CBERS-2影像解译成果, 并将

土地利用类型分为6类,即耕地、草地、林地、水体、建设用地和未利用地^[22-23]。

2.3 方法

2.3.1 基于气候要素与土地利用的北方农牧交错带界线提取 近几十年来,各专家学者基于不同的专业背景提出了多种界定北方农牧交错带范围的指标,但一直以来存在较大的争论和分歧。在以往研究中,北方农牧交错带界线的界定指标主要有两类:一是基于气候要素的指标,二是基于土地利用空间分布比例的指标。

在基于气候要素的界定指标方面,朱震达等^[24]使用年降水量300~500 mm界定;赵哈林等^[2]使用降水量300~450 mm、降水变化率15%~30%、干燥度1.0~2.0的内蒙古高原南缘和长城沿线界定北方农牧交错带;刘军会等^[4]在上述界定范围的基础上以年降水量400 mm等值线为中心、降水年变率15%~30%、干燥度指数0.2~0.5进行界定,并用多年平均降水量300 mm、450 mm等值线修订西北界和东南界。本文在综合前人研究的基础上,采用的基于气候要素的北方农牧交错带界线(气候界线)界定规则为:在刘军会等^[4]根据降水年变率15%~30%、干燥度指数0.2~0.5界定范围的基础上,以年降水量400 mm等值线为中心、300 mm等值线为西北界、500 mm等值线为东南界。西北界与东南界未闭合的部分,通过350 mm、400 mm、450 mm降水等值线,从300 mm到500 mm降水等值线平滑过渡连接。为了具有可比性,每一段界线的等值线在不同时间范围内的选取规则一致,完成界线的闭合。根据气候要素指标及界定规则,提取了20世纪70年代、80年代、90年代和21世纪前10年4期气候界线。

在基于土地利用的界定指标方面,Ye等^[6]将农业用地比例在15%~35%作为农牧交错带土地利用界线的定义;王静爱等^[25]界定范围时使用了农业用地占15%~35%、牧业用地占35%~75%的指标,但主要针对的是以牧业为主的内蒙古地区;吴传钧等^[26]对农牧交错带的定义为农、牧、林的比例为1:0.5:1.5。因此,本文基于土地利用的北方农牧交错带界线(土地利用界线)界定规则为:在已有的北方农牧交错带生态分区的范围内,提取土地利用百分比栅格中满足栅格内耕地和草地比重均大于15%的连片区域。根据20世纪70年代末期、80年代末期、2000年和2010年土地利用百分比栅格数据,提取了20世纪70年代、80年代、90年代和21世纪前10年4期土地利用界线。

2.3.2 农牧交错带界线在垂直和水平方向变动的探测方法(FishNet方法) 垂直和水平方向变动探测方法(FishNet方法)是指利用ArcGIS中的渔网(FishNet)功能,对不同年代北方农牧交错带界线在水平(东西)方向和垂直(南北)方向的变动情况分别进行探测。根据所有年代界线的最大地理范围,生成1 km×1 km的渔网,根据生态功能区分区计算每两期土地利用或气候界线在每条水平和竖直方向渔网线上的变动距离,并标记变动方向。水平(垂直)渔网线由东向西(由南向北)依次穿过较早时期的界线、较晚时期的界线时,记Direction为1;水平(垂直)渔网线由东向西(由南向北)依次穿过较晚时期的界线、较早时期的界线时,记Direction为-1;水平(垂直)渔网线由东向西(由南向北)依次穿过同一时期的界线时,Direction为0。根据式(1)计算得到带方向标志的距离:

$$D_{fp-lp} = L_{fp-lp} \times Direction \quad (1)$$

式中: fp 为较早年代; lp 为较晚年代; L_{fp-lp} 为统计得到的渔网线的长度; $Direction$ 代表标记的方向; D_{fp-lp} 代表带方向标志的距离。根据 L_{fp-lp} 可统计气候界线、土地利用界线每两个时期的最大和最小变动距离、变动距离中位数、平均数等参数,根据 D_{fp-lp} 可统计气候界线和土地利用界线在不同方向的变动程度及二者的相关性。

2.3.3 农牧交错带界线在变迁方向变动的探测方法(DSAS方法) 农牧交错带界线在变迁方向变动的探测方法(DSAS方法)是根据界线的缓冲区建立基线,沿基线每隔1 km做垂直于基线的等间隔垂线段(transects)与农牧交错带界线相交,根据生态功能区分区分别统计各期界线与每条等间隔垂线段的交点到基线的距离 D_p ,并根据公式(2)计算每两期土地利用或气候界线在每条等间隔垂线段上的变动距离、变动方向等参数:

$$D_{jp-lp} = D_{lp} - D_{jp} \quad (2)$$

式中: D_{jp} 为较早年代界线到基线的距离; D_{lp} 为较晚年代界线到基线的距离; D_{jp-lp} 代表带方向标志的距离。根据 D_{jp-lp} 的绝对值统计气候界线和土地利用界线每两个时期的最大和最小变动距离以及变动距离的平均数、中位数等参数,根据 D_{jp-lp} 统计气候界线和土地利用界线在不同方向的变动程度及二者的相关性。

2.3.4 气候贡献率计算方法 根据FishNet和DSAS方法探测得到的各生态功能区内、每两个时期的气候和土地利用界线在每条渔网线上或每条等间隔垂线段上带方向的变动距离 D_{jp-lp} ,求取气候和土地利用界线两组数据的相关性、决定系数 r^2 以及显著性 p 。由于决定系数 r^2 可以说明自变量对因变量变化的影响程度,因此本文对呈显著正相关关系($p < 0.05$, $r > 0$)的气候与土地利用界线移动距离数据,选取决定系数 r^2 指标来定量评价气候驱动作用的贡献程度。

3 结果与讨论

3.1 基于FishNet方法的界线时空格局变化特征

3.1.1 气候界线变迁特征 由图2a、2c和2e可以看出,在水平(东西)方向上,气候界线最大变幅达278.54 km,发生在SE-2区20世纪90年代-21世纪前10年期间,向东移动。从各生态功能区来看,气候界线在1区全区、NW-2区以及SE-3区移动幅度较大,其中在20世纪90年代-21世纪前10年期间,NW-1区与NW-2区界线东移明显,而SE-3区向西大幅移动,移动距离中位数均处于较高水平,分别为91.88 km、78.76 km、72.02 km;相比之下,4区全区范围较小、探测样本少、变迁方向波动频繁且移动幅度最小,变动距离中位数大多小于10 km。从研究区整体上来看,气候界线在研究区东南段与西北段变动幅度差别不明显。

由图2b、2d和2f可以看出,垂直(南北)方向上,气候界线最大变动距离达271.25 km,发生在NW-1区20世纪70-80年代期间,向南移动。从各生态功能区来看,气候界线在东南段的移动幅度略大于西北段,且在1区全区、SE-2、SE-3区变幅较大,在NW-4区变幅最小,但有持续向北移动的趋势。由于20世纪80年代东北地区降水量的增加,1区全区、NW-3区、SE-2区在70-80年代期间界线均向南大幅移动,尤其在1区,其西北段和东南段界线变幅中位数分别达到97.28 km、84.93 km;随后的几十年间,随着降水的减少,气候界线逐渐北移。

3.1.2 土地利用界线变迁特征 由图2a、2c和2e可以看出,在水平(东西)方向上,土地利用最大变动距离达140.39 km,发生在SE-2区20世纪70-80年代期间,向东移动。从各生态功能区来看,与气候界线变迁特征类似,1区、2区土地利用界线移动幅度较大,其中NW-1区内界线在20世纪80-90年代期间西移明显,变幅中位数最大达32.34 km;而4区移动幅度较小且变幅中位数均小于7 km,西北段与东南段移动幅度相差不大。

由图2b、2d和2f可以看出,在垂直(南北)方向上,土地利用最大变动距离为

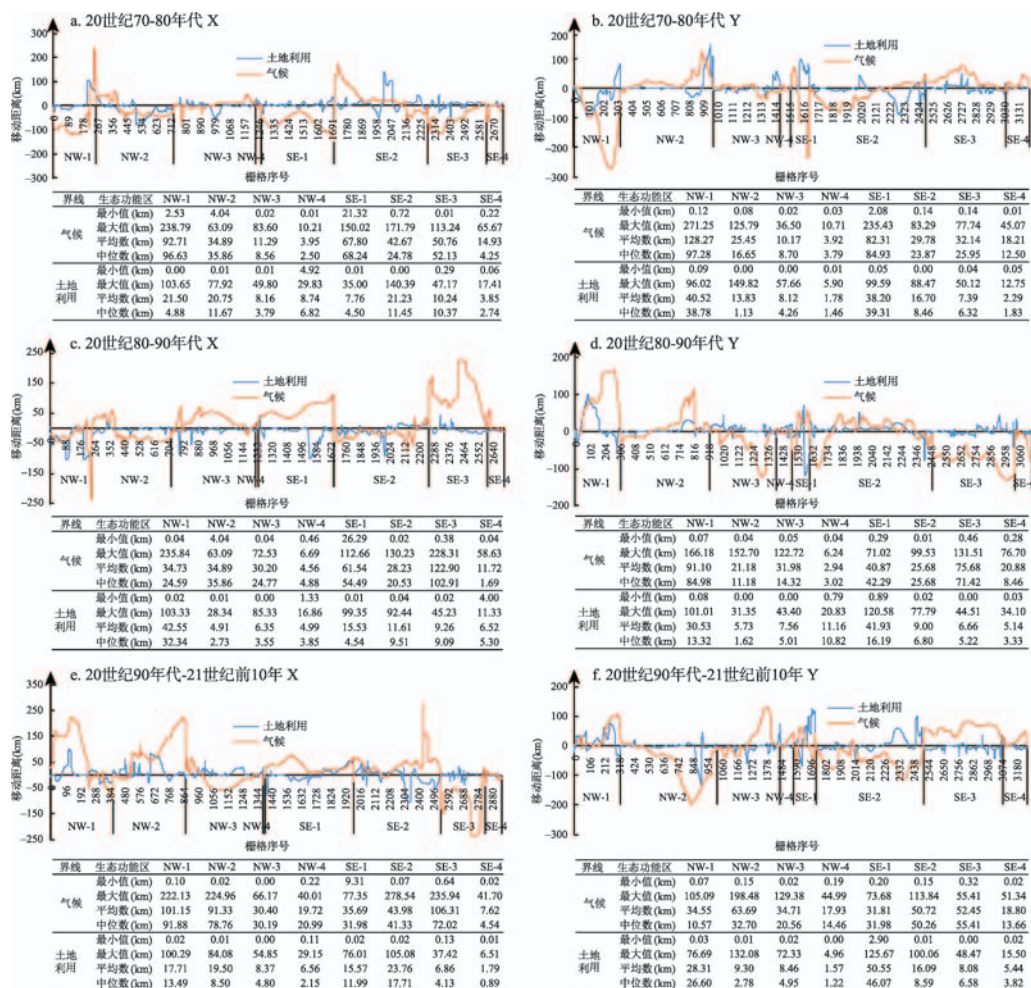


图2 基于FishNet方法探测气候与土地利用界线变迁情况

Fig. 2 Changes of climate and land use boundaries based on FishNet method

149.82 km, 发生在NW-2区20世纪70-80年代期间, 向北移动。从各生态功能区来看, 1区移动幅度较大, 其中SE-1区内界线在20世纪90年代-21世纪前10年期间向北大大幅变迁, 变幅中位数高达46.07 km; 2区、3区、4区移动幅度较小, 除80-90年代期间NW-4区界线移动中位数为10.82 km外, 其余各区域各时期界线移动距离中位数均小于10 km。

3.2 基于DSAS方法的界线时空格局变化特征

3.2.1 气候界线变迁特征 由图3a、3c和3e可见, 各个时期、各生态功能区内气候界线发生了较为明显的变动。经过DSAS方法的统计, 气候界线的最大变动距离为299.09 km, 向南移动, 发生在SE-1区20世纪70-80年代期间。从生态功能区来看, 气候界线移动特征与FishNet方法下探测结果类似, 在1区、2区移动幅度较大, 尤其在70-80年代期间, SE-1区内界线变动剧烈, 有向西移动的趋势, 移动距离中位数高达103.75 km; 4区内界线变动幅度最小, 除90年代-21世纪前10年期间在NW-4区的界线移动距离中位数为16.71 km, 其余移动距离中位数均小于5 km; 在研究区东南段变幅略大于西北段。

3.2.2 土地利用界线变迁特征 由图3b、3d和3f可见, 基于DSAS方法在线尺度上对土地利用界线的变迁距离和变迁方向进行统计, 最大变迁距离为217.79 km, 向东北方向移



图3 基于DSAS方法探测气候与土地利用界线变迁情况
Fig. 3 Changes of climate and land use boundaries based on DSAS method

动, 发生在SE-1区的20世纪90年代-21世纪前10年期间。从各生态功能区上来看, 1区各时期土地利用界线变动距离的中位数、平均值均较高, 变幅最大, 在NW-1区80-90年代期间界线向西北大幅移动, 移动距离中位数达28.89 km; 与FishNet在垂直方向上的探测结果类似, 土地利用界线在2区、3区及4区移动幅度较小, 除在NW-4区80-90年代期间移动距离中位数达12.39 km, 其余区域在各时期均小于10 km, 且界线在东南段的移动幅度与西北段移动幅度差别不大。

3.3 基于FishNet方法的气候驱动作用定量分析

基于FishNet方法定量探测的北方农牧交错带界线在不同地区、不同年代受气候的影响贡献程度有明显差别 (表2)。

从各生态功能区的角度来看, NW-1区西北段3个时间段的界线变迁在东西方向上均受气候变化显著影响, 贡献程度达10.7%~44.4%, 但在南北方向上仅在20世纪90年代-21世纪前10年期间, 受气候变化影响, 贡献率为4.7%。对于2区, 西北段在南北方向上3个时期内的界线变迁均受气候变化影响, 贡献率达8.8%~55.9%, 而在东西方向上仅在20世纪70-80年代期间气候驱动作用显著, 贡献率为20.9%; 该区东南段气候影响较小, 在东西方向上仅80-90年代期间气候驱动界线变化, 贡献率为4.0%。NW-3区在80-90年

表2 气候变化对北方农牧交错带界线变迁影响的定量探测
Tab. 2 The quantitative detection of climate change effects on the boundary fluctuation in the farming-pastoral ecotone of northern China

区域	阶段	X方向		Y方向		界线变迁方向	
		样本数	r^2	样本数	r^2	样本数	r^2
NW-1	20世纪70-80年代	261	0.444	—	—	580	0.027
	20世纪80-90年代	255	0.107	—	—	—	—
	20世纪90年代-21世纪前10年	411	0.202	331	0.047	580	0.011
NW-2	20世纪70-80年代	473	0.209	655	0.088	755	0.168
	20世纪80-90年代	—	—	726	0.559	—	—
	20世纪90年代-21世纪前10年	—	—	697	0.104	755	0.043
NW-3	20世纪70-80年代	—	—	—	—	—	—
	20世纪80-90年代	—	—	457	0.082	612	0.043
	20世纪90年代-21世纪前10年	—	—	—	—	—	—
NW-4	20世纪70-80年代	—	—	77	0.052	73	0.153
	20世纪80-90年代	—	—	—	—	—	—
	20世纪90年代-21世纪前10年	—	—	—	—	—	—
SE-1	20世纪70-80年代	—	—	—	—	—	—
	20世纪80-90年代	—	—	—	—	—	—
	20世纪90年代-21世纪前10年	—	—	—	—	891	0.015
SE-2	20世纪70-80年代	—	—	—	—	—	—
	20世纪80-90年代	567	0.040	—	—	985	0.032
	20世纪90年代-21世纪前10年	—	—	—	—	—	—
SE-3	20世纪70-80年代	357	0.201	568	0.227	932	0.099
	20世纪80-90年代	—	—	—	—	—	—
	20世纪90年代-21世纪前10年	—	—	—	—	932	0.019
SE-4	20世纪70-80年代	—	—	—	—	—	—
	20世纪80-90年代	—	—	—	—	—	—
	20世纪90年代-21世纪前10年	—	—	—	—	—	—

代期间,气候在南北方向上贡献率为8.2%;SE-3区在70-80年代期间气候在东西、南北方向上对界线均有显著影响,贡献率分别为20.1%、22.7%。4区内气候贡献率较低,仅在70-80年代期间,NW-4区内南北方向上气候驱动作用显著,贡献率为5.2%。

从不同时期的角度上来看,20世纪70-80年代时期内,在东西方向上NW-1区、NW-2区以及SE-3区的气候贡献率达20.1%~44.4%;在南北方向上,NW-2区、NW-4区以及SE-3区气候贡献率达5.2%~22.7%。80-90年代时期内,在东西方向上NW-1区和SE-2区的气候贡献率达4.0%~10.7%;在南北方向上,NW-2区以及NW-3区的贡献率达8.2%~55.9%。90年代-21世纪前10年时期内,气候在NW-1区、NW-2区的影响明显,尤其在东西方向上,NW-1区气候贡献率达20.2%;在南北方向上,NW-1区、NW-2区气候贡献率分别为4.7%、10.4%。

经过FishNet方法计算和统计,3个时期中气候在东西方向上最大贡献率为44.4%,发生在NW-1区,20世纪70-80年代期间;南北方向上最大贡献率为55.9%,发生在NW-2区,80-90年代期间。气候贡献率较高的区域主要集中在NW-1区及NW-2区,东西方向气候贡献率达10.7%~44.4%,南北方向上气候贡献率达4.7%~55.9%,说明中国东北地区

内各时期农牧交错带界线的移动过程中,气候的驱动作用明显。

3.4 基于DSAS方法的气候驱动作用定量分析

基于DSAS方法定量探测的北方农牧交错带界线在不同区域、不同年代气候对土地利用界线变迁的驱动作用与FishNet方法总体上类似,在变动方向和贡献率方面准确度更高(表2)。

从各生态功能区的角度上看,1区与2区受气候影响较大,其中NW-1区的土地利用界线在20世纪70-80年代以及90年代-21世纪前10年两个时期气候贡献率分别为2.7%、1.1%;SE-1区90年代-21世纪前10年期间贡献率为1.5%;NW-2区70-80年代以及90年代-21世纪前10年期间,气候对土地利用界线变迁的贡献率分别为16.8%、4.3%;SE-2区在80-90年代期间,气候贡献率为3.2%。3区与4区受气候影响有限,且在3区内气候对东南段的影响比西北段明显。SE-3区在70-80年代、90年代-21世纪前10年期间气候贡献率分别达到9.9%、1.9%,而NW-3区仅在80-90年代期间气候贡献显著,贡献率为4.3%;NW-4区在70-80年代期间内气候贡献率为15.3%。

从不同时期的角度上来看,20世纪70-80年代时期内,气候对土地利用界线的贡献程度较大,且西北段的气候贡献率2.7%~16.8%,略大于东南段;在80-90年代时期内,气候对土地利用的贡献程度比70-80年代期间小,气候贡献率为3.2%~4.3%;90年代-21世纪前10年时期内,1区全区、NW-2区及SE-3区内的土地利用界线均受气候的影响,气候贡献率达1.1%~4.3%。

经过DSAS方法计算和统计,气候最大贡献率达到16.8%,发生在NW-2区,20世纪70-80年代期间。气候驱动作用明显且贡献率较大的地区是NW-1区、NW-2区、NW-4区和SE-3区,且在70-80年代期间气候对各区域土地利用界线变动的贡献作用更为显著。

3.5 讨论

3.5.1 与前人研究对比 本文研究结果与前人得出的结论可相互验证。有多位学者的研究^[27-29]指出20世纪80年代以来气候变暖促进了东北地区耕地与草地间的转化及耕地的增加,导致中国东北地区的耕地快速扩张,与本文中NW-1区、NW-2区在此阶段气候贡献率显著的结论吻合。Liu等^[30]的研究表明,1986-2000年东北地区东南界(与本文SE-1区重叠)受人类活动影响,附近耕地大幅向西扩张;这与本文中SE-1区中前两个时期均未受到气候变化的显著影响的结果一致。Lu等^[31]的研究指出,退耕还林和禁牧政策的实施,导致西北段的界线变迁在1999年以后受政策影响明显,这与本文中的NW-3和NW-4区20世纪90年代-21世纪前10年阶段界线变迁受气候变化影响不显著相一致。Zuo等^[32]指出在中国西部地区,20世纪80年代以来土地利用变化受人为活动及政策因素主导,与本文中位于西北部的4区全区在80年代以后气候贡献均不显著的结论一致,人为因素^[11, 33]也是驱动北方农牧交错带界线变迁的重要因素。

3.5.2 FishNet方法与DSAS方法对比 FishNet方法与DSAS方法在探测北方农牧交错带界线的时空格局变化中得到的结果虽有差异,但大部分趋于一致。两种方法均探测得到气候界线移动幅度大于土地利用界线移动幅度,且界线在1区各时期变迁幅度较大,在4区变迁幅度较小;大部分区域移动距离的平均值、中位数更接近最小值,说明各区域内界线的变迁幅度有限;各区域界线变动方向探测结果大部分相同,如气候界线在2区、3区以及土地利用界线在SE-2、SE-3区各时期内的变迁方向在两种统计方法下所得结果一致。同时,探测结果存在差异,如基于FishNet方法,NW-1区气候界线在20世纪70-80年代期间向西、向南移动,而基于DSAS方法则向西北移动,原因在于FishNet方法分开

探测界线在水平、垂直方向上的移动情况,存在无法将某一位置的界线水平和垂直方向上的变化距离对应起来的情况,相比于DSAS探测结果,虽直观明了,但在精确度上有所欠缺。

在气候对北方农牧交错带界线变迁贡献程度方面,可以看出气候对北方农牧交错带的影响在各个区域和各个时期有所差异,但基于FishNet方法与DSAS方法下得出的结论大体趋于一致。如NW-2区20世纪70-80年代期间, FishNet方法下气候在东西、南北方向上的贡献率分别为20.9%、8.8%, DSAS方法下气候贡献率为16.8%; SE-3区70-80年代期间, FishNet方法下气候在水平、垂直方向的贡献率为20.1%、22.7%, DSAS方法下,气候贡献率为9.9%。两种方法的统计结果中也存在差异,如NW-2区80-90年代期间, FishNet方法统计得到气候在南北方向上的贡献率达55.9%,但基于DSAS方法并未明显的表现出较高的贡献率,原因在于该区该时期内东西方向上气候界线与土地利用界线呈显著的负相关关系,又由于DSAS方法中等间隔垂线段的方向基本与界线走势垂直,相比于FishNet方法统计条件要求更高,故基于DSAS方法得出该区域该段时期内气候并未显著的驱动农牧交错带界线的变迁。

综合来看, FishNet方法直观地体现了气候在东西、南北方向上对北方农牧交错带界线的影响和贡献程度,方法简单但不精确,适用于大尺度、精确度要求不高且直观的统计分析; DSAS方法则更精确的给出气候在农牧交错带界线变化方向上的贡献程度,但统计条件要求高,且统计结果受设定的基线影响较大,更适用于小尺度上、精确探测界线的变化。两种方法均受极值影响较大,且分区交界处的不确定性较强。

4 结论

北方农牧交错带界线变迁是气候和人类活动共同作用的结果,人类活动和政策深刻影响着中国北方地区土地利用格局变化。本文提出了基于FishNet和DSAS的两种在1 km精细尺度上探测不同方向上气候变化对农牧交错带界线变迁贡献程度的定量方法,有助于更好地理解气候变化对脆弱敏感区的定量影响,可为人类更好地适应气候变化提供方法支持。

由于北方农牧交错带跨度大、范围广,研究区自然环境复杂,不同区域和时期内变化趋势有所差异,因而本文在前人的相关研究基础上,根据生态功能区对北方农牧交错带进行了详细的划分,基于FishNet和DSAS两种方法对界线的定量探测得出,气候和土地利用界线在不同时期、不同区域的变迁情况和耦合关系有很大差异。在1区的变动幅度最大,在4区变动幅度最小。在NW-1区、NW-2区,气候和土地利用界线变迁表现出较高的空间耦合关系,该区域基于FishNet方法下水平方向上气候贡献率达10.7%~44.4%,垂直方向上达4.7%~55.9%,基于DSAS方法下气候贡献率为1.1%~16.8%。2区全区在各时期内气候界线与土地利用界线变动方向一致,表现出较高的空间耦合性,气候显著驱动界线变迁;而在20世纪80年代-21世纪前10年期间,4区内气候与土地利用界线的耦合关系较弱,气候并未显著驱动农牧交错带界线的变迁,与前人研究中西北地区土地利用情况受人为活动及政策影响深远的实际情况吻合,说明在北方农牧交错带气候界线与土地利用界线整体移动趋势相反的基础上,存在典型区域气候明显驱动农牧交错带变化。

通过对比两种方法的探测结果,可以看出FishNet方法与DSAS方法所得结论虽有差

异, 但大多趋于一致。DSAS 方法更接近实际情况, 总体精度上优于 FishNet 方法, 适用于小尺度上的精确探测; FishNet 方法则更为简单, 适用于大尺度上快速、直观的分析。

参考文献(References)

- [1] Zhao Jun, Li Xia. Research progress on the farming-pastoral ecotone in China. *Pratacultural Science*, 2009, 26(1): 94-99. [赵军, 李霞. 中国农牧交错带研究进展. 草业科学, 2009, 26(1): 94-99.]
- [2] Zhao Halin, Zhao Xueyong, Zhang Tonghui, et al. Boundary line on agro-pasture zigzag zone in North China and its problems on eco-environment. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5): 737-747. [赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题. 地球科学进展, 2002, 17(5): 739-747.]
- [3] Liu Junhui, Gao Jixi. Changes of land use and landscape pattern in the boundary change areas in farming-pastoral ecotone of northern China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(11): 76-82. [刘军会, 高吉喜. 北方农牧交错带界线变迁区的土地利用与景观格局变化. 农业工程学报, 2008, 24(11): 76-82.]
- [4] Liu Junhui, Gao Jixi. Spatial changes of boundary based on land use and climate change in the farming-pastoral ecotone of northern China. *China Environmental Science*, 2008, 28(3): 203-209. [刘军会, 高吉喜. 基于土地利用和气候变化的北方农牧交错带界线变迁. 中国环境科学, 2008, 28(3): 203-209.]
- [5] Li Qiuyue, Pan Xuebiao. The impact of climate change on boundary shift of farming pasture ecotone in northern China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(10): 1-6. [李秋月, 潘学标. 气候变化对我国北方农牧交错带空间位移的影响. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 1-6.]
- [6] Ye Y, Fang X. Expansion of cropland area and formation of the eastern farming-pastoral ecotone in northern China during the twentieth century. *Regional Environmental Change*, 2012, 12(4): 923-934.
- [7] Shi Xiaoli, Shi Wenjiao. Identifying contributions of climate change and human activities to cropland spatial-temporal changes: A review. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1463-1476. [石晓丽, 史文娇. 气候变化和人类活动对耕地格局变化的贡献归因综述. 地理学报, 2015, 70(9): 1463-1476.]
- [8] Gao Zhiqiang, Yi Wei. Land use change in China and analysis of its driving forces using CLUE-S and Dinamica EGO model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 208-216. [高志强, 易维. 基于 CLUE-S 和 Dinamica EGO 模型的土地利用变化及驱动力分析. 农业工程学报, 2012, 28(16): 208-216.]
- [9] Deng Xiangzheng, Zhan Jinyan. Scale-effect analysis of LUCC driving forces in the farming-pasturing interlocked area in northern China. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(3): 64-68. [邓祥征, 战金艳. 中国北方农牧交错带土地利用变化驱动力的尺度效应分析. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 64-68.]
- [10] Su Wei, Liu Xiaoxuan, Luo Qian, et al. Responses of vegetation to change of meteorological factors in agricultural-pastoral area of northern China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 352-359. [苏伟, 刘晓暄, 罗倩, 等. 北方农牧交错带植被对气象因子变化的响应规律研究. 农业机械学报, 2015, 46(11): 352-359.]
- [11] Yang Y, Zhang S, Wang D, et al. Spatiotemporal changes of farming-pastoral ecotone in northern China, 1954-2005: A case study in Zhenlai County, Jilin Province. *Sustainability*, 2014, 7(1): 1-22.
- [12] Gao Zhiqiang, Liu Jiuyan. The LUCC responses to climate changes in China from 1980 to 2000. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 865-872. [高志强, 刘纪远. 1980-2000 年中国 LUCC 对气候变化的响应. 地理学报, 2006, 61(8): 865-872.]
- [13] Ye Y, Fang X. Boundary shift of potential suitable agricultural area in farming-grazing transitional zone in northeastern China under background of climate change during 20th century. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(6): 655-665.
- [14] Shi W, Tao F, Liu J, et al. Has climate change driven spatio-temporal changes of cropland in northern China since the 1970s? *Climatic Change*, 2014, 124(1/2): 163-177.
- [15] Wang Y, Hou X, Jia M, et al. Remote detection of shoreline changes in eastern bank of Laizhou Bay, North China. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014, 42(3): 621-631.
- [16] Jayson-Quashigah P, Appeaning Addo K, Kufogbe S. Medium resolution satellite imagery as a tool for monitoring shoreline change: Case study of the Eastern coast of Ghana. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65(sp1): 511-516.
- [17] Hunag Qing, Xin Xiaoping, Zhang Hongbin. Ecosystem-service-based regionalization of the grassland and agro-pastoral transition zone in northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 350-356. [黄青, 辛晓平, 张宏斌. 基于生

- 态系统服务功能的中國北方草地及农牧交错带区划. 生态学报, 2010, 30(2): 350-356.]
- [18] Li Z, Yan Z. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960-2008. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2009, 2(4): 236-242.
- [19] Liu J, Liu M, Zhuang D, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(4): 373-384.
- [20] Liu J, Liu M, Tian H, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 442-456.
- [21] Liu J, Zhang Z, Xu X, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [22] Liu Jiyan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang, et al. The Study on the Spatial-temporal Information of Land Use Changes in China with Remote Sensing in 1990s. Beijing: Science Press, 2005. [刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20世纪90年代中国土地利用变化的遥感时空信息研究. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [23] Zhang Zengxiang, Zhao Xiaoli, Wang Xiao. Remote Sensing Monitoring of Land Use in China. Beijing: Star Map Press, 2012. [张增祥, 赵晓丽, 汪潇. 中国土地利用遥感监测. 北京: 星球地图出版社, 2012.]
- [24] Zhu Zhenda, Liu Shu, Yang Youlin. The possibilities and realities on re-management of desertified lands in the inter-distributing areas for agricultural and grazing practices in northern China. *Scientia Geographica Sinica*, 1984, 4(3): 197-206. [朱震达, 刘恕, 杨有林. 试论中国北方农牧交错地区沙漠化土地整治的可能性和现实性. 地理科学, 1984, 4(3): 197-206.]
- [25] Wang Jingai, Shi Peijun. The utilization of land resources and regional development strategies of farming-pastoral zone in Inner Mongolia. *Areal Research and Development*, 1988, 7(1): 24-28. [王静爱, 史培军. 论内蒙古农牧交错地带土地资源利用及区域发展战略. 地域研究与开发, 1988, 7(1): 24-28.]
- [26] Wu Chuanjun, Guo Huancheng. The Land Use of China. Beijing: Science Press, 1994. [吴传钧, 郭焕成. 中国土地利用. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [27] Ye Y, Fang X, Khan MAU. Migration and reclamation in Northeast China in response to climatic disasters in North China over the past 300 years. *Regional Environmental Change*, 2012, 12(1): 193-206.
- [28] Liu D, Wang Z, Song K, et al. Land use/cover changes and environmental consequences in Songnen Plain, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(4): 299-305.
- [29] Wang Z, Liu Z, Song K, et al. Land use changes in Northeast China driven by human activities and climatic variation. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(3): 225-230.
- [30] Liu J, Gao J, Lv S, et al. Shifting farming-pastoral ecotone in China under climate and land use changes. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(3): 298-308.
- [31] Lu W, Jia G. Fluctuation of farming-pastoral ecotone in association with changing East Asia monsoon climate. *Climatic Change*, 2013, 119(3): 747-760.
- [32] Zuo L, Zhang Z, Zhao X, et al. Multitemporal analysis of cropland transition in a climate-sensitive area: A case study of the arid and semiarid region of northwest China. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 75-89.
- [33] Liu J, Kuang W, Zhang Z, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195-210.

Quantitative methods for detecting the impacts of climate change on the fluctuation of farming-pastoral ecotone boundaries in northern China

SHI Wenjiao^{1,2,3,4}, LIU Yiting^{2,3}, SHI Xiaoli⁵

- (1. Key Laboratory of Land Use, Ministry of Land and Resources, China Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 4. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. Key Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Construction of Hebei Province, College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: The quantitative analysis of the effect of climate change on the fluctuation of farming-pastoral ecotone (FPE) boundary in northern China is a current focus in the field of response to climate change in ecological vulnerable regions. Previous studies have given profound descriptions about the effects of climate change on the boundary shifts of the ecotones qualitatively, but lacked quantitative analysis of the contribution of climate change on both spatial and temporal scales. Here, climate data from national meteorological stations and land use data interpreted from remote sensing images of the farming-pastoral ecotone (FPE) in northern China since 1970 were used to describe boundaries of the FPE based on both climate and land use in the 1970s, 1980s, 1990s and 2000s. Detection in horizontal and vertical directions method (FishNet) and Digital Shoreline Analysis System method (DSAS) were applied to detect the spatial pattern of the FPE boundaries and to examine how much of the boundaries shifts can be explained by climate change in different periods. The results showed that the spatial pattern of the FPE boundaries and contributions of climate varied in different regions and periods. The FPE boundaries moved slightly in the northwest part of the FPE and violently in the northeast part. The shift of climate and land use boundaries in northwest segment of the Greater Hinggan Mountains showed the most highly coupling relationship and the contribution rate of climate change reached 10.7%-44.4% in east-west direction and 4.7%-55.9% in north-south direction based on FishNet method and 1.1%-16.8% based on DSAS method from the 1970s to the 2000s. Most of the detections based on the two methods had consistent results. Moreover, DSAS method was better than FishNet method in overall accuracy and suitable for the precise detection in small range, while FishNet method was more appropriate for intuitive, rapid and low-precision analysis. Our findings highlight the importance of different adaption measures to climate change in the FPE of northern China in different regions and periods.

Keywords: farming-pastoral ecotone (FPE) in northern China; climate change; land use; detection in horizontal and vertical directions method (FishNet); digital shoreline analysis system method (DSAS); quantitative detection