

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.015

# RCPs 气候情景下三江平原典型流域耕地动态模拟

周浩 雷国平 杨雪昕 王婷婷

(东北大学土地管理研究所, 沈阳 110169)

**摘要:** 选取三江平原典型流域挠力河流域为研究区,以 1990、2002 和 2014 年 3 期 Landsat 影像、DEM 数据和社会经济统计资料等多源数据为基本信息源,结合 3S 技术,运用 FLUS 模型定量模拟代表性浓度路径情景系列(RCPs)下耕地动态变化特征。结果表明:24 a 间挠力河流域的旱地面积变化幅度较小,水田面积持续增加,1990—2002 年水田扩张剧烈,2002—2014 年扩张速度趋于缓和;3 个时点的旱地均沿东北—西南轴方向进行分布,主轴沿顺时针缓慢旋转,空间变化稳定,分布范围逐渐减小。水田沿东北—西南走向分布,1990—2002 年其主轴逆时针旋转,后顺时针旋转至 45.31°,整体分布较为离散,极化特征不明显;通过对比不同空间分辨率及时间尺度下模拟精度,确定最优模拟空间分辨率为 200 m,最优模拟时间点为 2038 年;MESSAGE 气候模式下,未来挠力河流域的旱地面积先减少后增加,水田继续维持扩张态势,2029 年后面积将以 2% 速度逐年下降,其分布将更加聚集,主轴沿顺时针旋转,重心逐渐向东北方向进行偏移;AIM 气候模式下,气候波动对水田的影响程度大于旱地,旱地面积持续缓慢增加,水田面积在波动中下降,空间分布的极化特征突出。

**关键词:** 政府间气候变化专门委员会; RCPs 情景; FLUS 模型; 耕地模拟; 挠力河流域

**中图分类号:** F323.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0121-13

## Simulation of Cultivated Land under RCPs Scenarios in Typical Basin of Sanjiang Plain

ZHOU Hao LEI Guoping YANG Xuexin WANG Tingting

*(Land Management Institute, Northeastern University, Shenyang 110169, China)*

**Abstract:** Since the mid-20th century, the climatic tendency of warming and drying had been shown distinctly in the mid-latitude zone of the North Hemisphere. It was of a series of impacts on the water resources system, especially in the semi-arid regions. In 1990s, the agricultural structure of Naoli River Basin, which was located in the hinterland of Sanjiang Plain, had been greatly adjusted with large amount of dry land changed into paddy field with global climate change and intensive activities of human beings. The dynamic change of cultivated land was discussed by using the future land use simulation model to simulate the distribution of cultivated land. All the above analysis was done by using the remote sensing image data, the DEM data and socioeconomic statistics data as fundamental data resources. Results showed that the growth rate of cultivated land was decreased gradually from 1990 to 2014, and different time periods showed different changing characteristics. During the period from 1990 to 2002, the area of paddy field was increased dramatically, while that of the dry land was increased slightly, from 2002 to 2014, the growth rate of paddy field area showed significantly decreased characteristics and the total area of dry land was decreased in a certain degree. The spatial pattern showed that the dry land was moving along the northeast-southwest axis in 1990, 2002 and 2014. The spindle rotates in a clockwise direction, and showed stable spatial distribution characteristics. Although the distribution tended to be more discredited, the spatial distribution was decreasing. The paddy field was along the northeast-southwest axis, and from 1990 to 2002, the spindle rotates counterclockwise and the rotated clockwise to 45.31° in 2014, and the paddy field also showed the characteristics of discrete distribution, but the polarization characteristic tended to be weakened. By comparing different spatial resolution with simulated distribution

收稿日期: 2017-06-15 修回日期: 2017-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671520)

作者简介: 周浩(1990—),男,博士生,主要从事土地利用与规划研究,E-mail: zhouhao7404@163.com

通信作者: 雷国平(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事土地利用规划与土地管理研究,E-mail: guopinglei@126.com

of cultivated land by using the future land use simulation model. And the determined optimal resolution was 200 m and the optimal simulation time was 2038. The simulation results which was simulated by the MESSAGE mode showed that the dry land area would be decreased for the first stage and then increased for the second stage in the future, and the paddy field area would maintain the rising trend. The distribution of paddy fields would be more concentrated, and the main axis would rotate along the clockwise direction, the polarization characteristic was obvious, the paddy field gravity center displacement was not obvious. The AIM mode was also used to simulate the distribution of cultivated land, and results showed that the dry land was increased slowly, and the paddy field was decreased which maintained the trend of fluctuation, the influence of climate fluctuation on paddy field was significantly higher than that of dry land, and the dry land spatial pattern changed slowly, and the comprehensive polarization characteristics of paddy field were more prominent. These research results can be used as references and consultancies for the cultivated land management in the Naoli River Basin and Sanjiang Plain.

**Key words:** intergovernmental panel on climate change (IPCC); RCPs scenarios; future land use simulation model (FLUS); cultivated land simulated; Naoli River Basin

## 引言

确保粮食安全是关乎国计民生的首要任务,而耕地是粮食生产的基本物质条件,其格局表征着生产要素的空间配置条件、粮食生产能力状况及利用可持续性,被认为是多要素的综合驱动结果<sup>[1-2]</sup>。从世界范围来看,城市化、人口增长和经济发展是影响耕地总量、人均耕地变化的重要因素<sup>[3]</sup>。在我国,政策、经济发展以及气候变暖主导着21世纪耕地的动态变化<sup>[4]</sup>,在东部发达地区经济和政策环境为主要驱动因素,中西部则以自然条件因素为主<sup>[5-6]</sup>,而在东北部地区,极端气候灾害加深了土地与人口之间的矛盾,导致耕地大规模开垦,形成气候-政策-开垦的有机链<sup>[2,7]</sup>。气候变化通过气候成分、气候要素变化等多种途径影响农业的作物种植区域、种植制度和生产状况等<sup>[8-10]</sup>,尤其对中高纬度地区的耕地时空演变有着巨大的推动作用。鉴于此,我国作为耕地最为紧张的第一人口大国,在施行最为严厉的耕地政策前提下,也更需关注未来气候环境下耕地时空演变特征,以应对气候变化对我国粮食安全造成的影响。

通过分解、剖析复杂的社会经济和自然生态因素与不同用地类型之间的相互作用,可以预测土地利用空间格局,进而分析其变化可能带来的影响与效应<sup>[11]</sup>。目前,国内外已有大量针对土地利用格局模拟的方法,如CLUE-S模型<sup>[12-13]</sup>、元胞自动机(CA)模型<sup>[14]</sup>、Agent模型<sup>[15]</sup>、DLS模型<sup>[16]</sup>和InVEST模型<sup>[17]</sup>等,其中尤以元胞自动机模型应用成熟和广泛,并逐渐演化出CA-Markov<sup>[18]</sup>、LSSVM-CA<sup>[19]</sup>、GPU-CA<sup>[20]</sup>等模型。然而在土地格局模拟过程中,多种用地类型之间的变化牵涉到复杂的转换关系,单一模拟技术难以系统描述不同时空尺

度下土地利用格局,综合高性能计算技术、地理信息技术及非线性复杂模拟技术是目前土地利用格局模拟的大趋势<sup>[21]</sup>。值得强调的是,运用自下而上的策略来模拟复杂的非线性动态地理模拟系统的理论框架<sup>[22]</sup>,弥补了常规GIS过程分析能力不足的问题,并将元胞自动机(CA)、多智能体系统(MAS)以及生物智能(SI)集成为地理模拟与空间优化系统(Geographical simulation and optimization system, GeoSOS)<sup>[23]</sup>,由其演化与改进而来的FLUS模型解决了传统元胞自动机中转换规则及参数确定复杂等问题<sup>[24]</sup>,能够很好地实现人类活动与自然条件影响下土地利用格局情景模拟的目的。

近年来,在全国耕地面积减少的背景下,三江平原耕地面积显著增加,同时,气候变暖对以积温为主要限制因子的该地区耕地面积增加起到了促进作用<sup>[25-26]</sup>,随着积温带的北移东扩,耕地垦殖由南向北、由西向东不断推进<sup>[27]</sup>,其中水稻种植区北界由1980年前期的47°N移至51°N附近<sup>[28-29]</sup>,该地区在国家粮食安全中的战略地位逐渐提升。同时伴随着一系列生态环境保育和耕地保护措施的出台,水田作为三江平原地区最主要的耕地景观类型以及我国粮食安全的重要保障,越来越引起人们的关注<sup>[30-32]</sup>。挠力河流域(131°31'~134°10'E,45°43'~47°45'N)位于三江平原腹地,恰为变暖现象突出的纬度位置,近50a当地农业开发活动特别强烈,经历了多次大规模土地利用开发,尤其在1980年国家进入经济迅速发展时期后,大量易涝旱地转变为水田,水田扩张尤其剧烈<sup>[33-35]</sup>。在气候变化背景下,研究该地区耕地时空演化特征,对保障未来我国粮食安全具有重要的意义。IPCC第5次评估报告(IPCC AR5)开发了一套不用辐射强度强迫而强调以浓度为目标的代表性浓度路径新情景(RCPs),该

系列情景将气候、大气和碳循环预估与排放和社会经济情景有机结合起来<sup>[36-37]</sup>,较过去评估报告中设定的相同温室源排放速率的气候模式更为合理和科学。本文依据 IPCC 第 5 次评估报告中所发布的典型浓度路径下不同气候模式,运用 FLUS 模型模拟不同气候模式下耕地空间格局,在与国际相关研究链接的基础上,预估未来该地区耕地动态变化特征,以期当地乃至三江平原的耕地适应性调整提供科学依据。

## 1 研究区概况及资料来源

### 1.1 基本自然要素特征

挠力河流域面积  $2.49 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,地处半干旱地带,为中温带大陆性季风气候区,春季干旱频繁,秋季多洪涝灾害,流域多年平均降水量 518 mm,降水分布不均匀,主要集中于 6—9 月份。该流域呈现西南高、东北低的态势,水系自西南流向东北。地貌类型主要是山地和平原,其中山地占流域面积的 38.3%,主要分布于流域西南部和南部,平原占 61.7%,主要分布于流域北部和中部的内、外七星河

及挠力河中游地区。挠力河流域已建成 4 县(富锦县、友谊县、集贤县和宝清县)3 区(宝山区、尖山区和四方台区)(图 1),挠力河干流的下游北岸和中游东岸以国营农场(主要为七星农场、创业农场、大兴农场、红卫农场、胜利农场、八五二农场、八五三农场和红旗岭农场)为主,地势平坦,作物种植条件优越,农业现代化程度很高。挠力河流域中部的内外七星河地区的行政管理属性主要为地方,家庭农场和个体农户是主要的耕地利用管理对象。挠力河流域耕地类型主要为水田和旱地,水浇地面积积极少,其中水田以单季稻种植为主,旱地采取玉米→小麦形式的轮作方式,一年一熟,是三江平原主要的粮食产区和国家重要商品粮生产基地。

挠力河流域农业开发活动非常活跃,建国以来经历多次大规模土地开发,其中 1990—2002 年是第 4 次垦荒高潮,当地政府采取资金补贴等相关政策,推行“以稻治涝”种植模式,大量低洼旱地改造为水田,土地利用格局变化剧烈,至 2002 年,农业结构调整政策基本推行完毕,因此,本文基础耕地信息研究时点确定为 1990 年、2002 年和 2014 年。

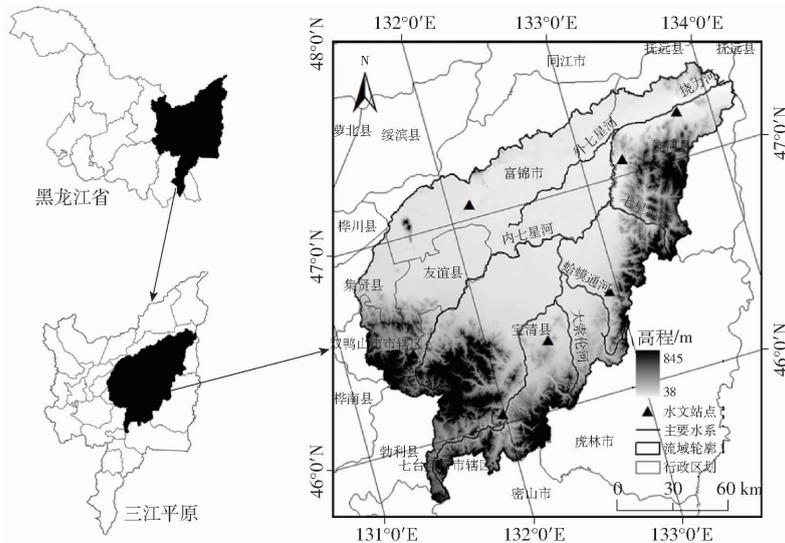


图 1 挠力河流域地理位置示意图

Fig. 1 Location of Naoli River Basin

### 1.2 数据来源与处理

选取美国陆地资源卫星 1990 年、2002 年和 2014 年 Landsat TM/OLI 的四景(条带号:114 和 115,行编号:027 和 028)云量符合标准的耕作期(6—8 月份)影像为主要数据源。考虑到该流域旱作物基本不灌溉和水浇地面积很小的特点,为便于研究将土地利用二级分类中水浇地和旱地统一归为旱地,最终确定土地利用类型为耕地(旱地和水田)、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类<sup>[28]</sup>。根据影像色调、纹理等特征,配合流域野外地物调查结果(图 2)进行人工目视解译,将所得数

据查错、修改和拼接后得到流域 3 期土地利用矢量数据;基础地理空间数据源自数字高程模型(DEM),精度 30 m,利用 ArcGIS 10.2 得到地理经度、地理纬度、高程和坡度等信息;其他数据包括流域数字地形图、交通图、居民点分布图、地下水分布数据和县、市经济社会统计资料。各图件经投影变换统一转为 Albers 双标准纬线等积投影。

## 2 研究方法

### 2.1 耕地空间变化特征分析

空间依赖性空间数据的基本特征,独立性假

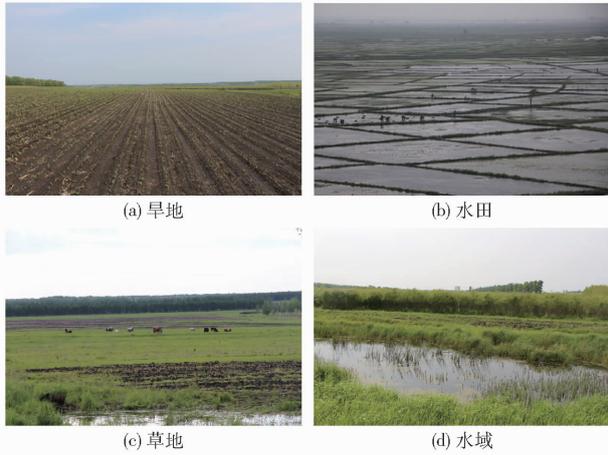


图2 挠力河流域典型地物样本

Fig.2 Typical features of Naoli River Basin

设不成立,对空间数据的直接统计推理可能导致误导性的结论。中心形态学忽略空间数据的依赖性特征,未触及独立性假设以及一般统计方法的可靠性问题。中心形态学中的标准差椭圆分析方法侧重数据的整体性、格局性和图形性,能够直观精确地计量空间格局的多方面特征,通过椭圆之间的相似性建立空间格局的顺序,通过椭圆之间的差异性鉴别空

$$\tan\theta = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i'^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 y_i'^2 + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i'^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 y_i'^2\right)^2 + 4\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i' y_i'\right)^2}}{2\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i' y_i'} \quad (2)$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i x_i' \cos\theta - w_i y_i' \sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (3)$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i x_i' \sin\theta - w_i y_i' \cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (4)$$

式中  $x_i', y_i'$ ——各点距离平均中心的相对坐标  
 $\theta$ ——由正北方向顺时针旋转到主轴所形成的夹角  
 $\delta_x, \delta_y$ ——沿  $x$  轴和  $y$  轴的标准差

标准差椭圆的形状指数(沿辅轴标准差除以沿主轴标准差的无量纲数值)反映椭圆方向的确切性和向心力程度,可用来衡量耕地(水田和旱地)总体分布格局,值越大形状越接近于圆,分布的随机性越大,极化特征越不突出,反之越接近于线性,方向性特征越突出,极化特征越明显。

## 2.2 基于 FLUS 模型的多情景耕地格局模拟

土地利用变化模拟过程中,不但涉及到多种土地利用类型间复杂的转换关系,而且需要人为确定模型的结构、转换规则及参数。神经网络(ANN)在

间格局的各种状态<sup>[31]</sup>。它能够描述节点在各个方向的离散状况,其形态在一定程度上可以反映节点空间组织的总体轮廓和主导分布方向。一般来说,标准差椭圆常用来度量一组点的数据空间分布特征,考虑到不同大小的耕地(旱地和水田)斑块对应不同面积的耕地,可以将各斑块的面积赋值到对应斑块的几何中心点上以实现标准差椭圆分析的目的。其中心,即节点分布重心的迁移情况则反映总体空间位移特征,即

$$M(\bar{X}, \bar{Y}) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (1)$$

式中  $M(\bar{X}, \bar{Y})$ ——耕地(旱地和水田)空间分布重心  
 $n$ ——分析单元数目  
 $w_i$ ——分析单元的属性值,为  $i$  对应分析单元的空间权重  
 $x_i, y_i$ ——第  $i$  个子单元的中心坐标

标准差椭圆主要由 3 个基本要素构成:转角  $\theta$ 、沿主轴(长轴)的标准差和沿辅轴(短轴)的标准差,即

模拟复杂的变化曲面、保证较高的模拟精度和模拟数据要求上具有明显的优势,ANN 能有效处理带有噪声、冗余或不完整的数据,适用于处理非线性或无法用数学来描述的复杂系统<sup>[35]</sup>。

首先,FLUS 模型利用神经网络来代替转换规则,从一期土地利用数据与包含人为活动与自然效应的多种驱动力因子获取各用地类型在研究范围内的变化发生概率。其次,FLUS 模型采用从一期土地利用数据中采样的方式,能较好地避免误差传递的发生。另外,在土地利用模拟过程中,FLUS 模型提出一种基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,该机制能有效处理多种土地利用类型在自然作用与人类活动共同影响下发生相互转换时的不确定性与复杂性,使得 FLUS 模型具有较高的模拟精度并且能获得与现实土地利用分布相似的结果。

FLUS 模型由 2 个主要模块构成,分别为基于神经网络的适宜性概率计算模块和基于自适应惯性机制的元胞自动机模块。基于神经网络的适宜性概率计算模块需输入土地利用变化驱动因子,允许驱动因子之间存在相关性,设置神经网络训练采样比例(本文设置为 2%),并选用随机采样模式进行各类用地的训练样本采样(本文训练隐藏层数量设置为

12), 实现神经网络训练。结合标准化处理后各驱动因子分布状况, 最终计算得到土地利用类型在各像元上的适宜性概率; 基于自适应惯性机制的元胞自动机模块以多类别或双类别空间土地利用数据为初始输入数据, 需预设各土地利用类型变化数量的目标(本文采用 RCPs 情景数据中土地利用需求数据), 然后根据经验确定不同土地类型间的相互转换难易度(0~1, 0 表示不允许转换, 1 表示可自由转换), 最后设置土地利用类型相互转换的限制发生区域(本文将七星河国家级自然保护区, 2013 年建立三环泡国家级自然保护区等区域设为挠力河流域土地利用变化限制发生区)。模型参数设定上, 将模拟迭代目标次数设置为 300, 即模型到达迭代目标会提前停止, 领域大小设置为  $5 \times 5$ , 最终实现挠力河流域土地利用变化模拟(图 3)。

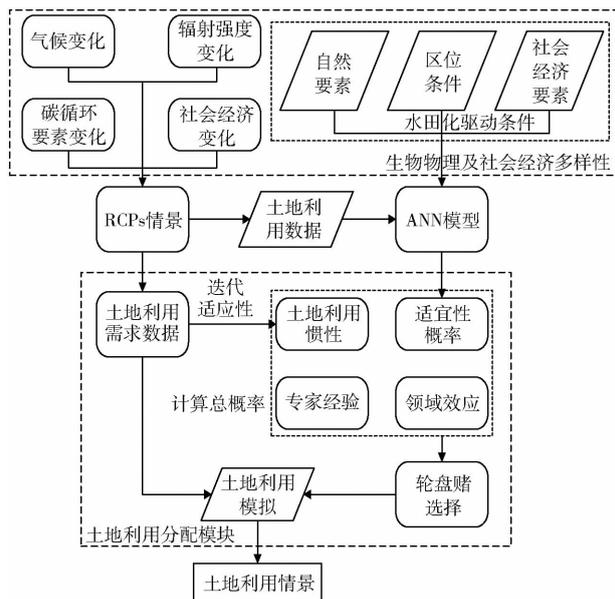


图 3 RCPs 情景下运用 FLUS 模型模拟土地利用现状的技术框架

Fig. 3 Technical framework of using future land use simulation model to simulate land use status under RCPs scenarios

### 2.2.1 预案设定

IPCC 第 1 次至第 4 次评估报告 (AR1 ~ AR4) 对未来环境的情景设定都是以排放的温室气体和空气悬浮微粒等造成温度改变为准则, 所有气候模式均采用相同的排放速率, 但目前各国的减排策略多元化, 传统气候模式具有一定的局限性。IPCC 第 5 次评估报告中依据大气辐射强度来设定的代表性浓度路径情景系列 (RCPs) 涵盖了广泛的人为气候强迫, 着眼于较为科学的适应策略, 能够部分预估解耦气候科学与社会经济。大气中不同的  $\text{CO}_2$  浓度对应着不同的 RCPs 情景, 一方面  $\text{CO}_2$  浓度的改变将会导致积温条件、降水条件随之改变, 进而影响农作物的种

植条件, 促使耕地格局变化, 另一方面  $\text{CO}_2$  浓度直接影响着农作物的光合作用强度, 而对于中高纬度地区这种影响机理更为复杂, 正向作用与负向作用并存, 运用 RCPs 情景进行耕地格局模拟将具有独特的优势。本文在预案设定时, 分别采用 IPCC AR5 中 RCPs 气候模式情景系列下的最符合中国发展国情的 MESSAGE (RCP 8.5) 和 AIM (RCP 6.0) 气候模式<sup>[36]</sup>。

MESSAGE 气候模式为  $\text{CO}_2$  排放参考范围 90 百分位数的高端路径, 又称能源供应战略可替代方案及其一般环境影响模式, 该模式下世界各国不采取任何碳减排措施, 主要温室气体排放量、浓度和辐射强度持续递增, 大气中辐射强度增至大于  $8.5 \text{ W/m}^2$ , 相当于大气中  $\text{CO}_2$  浓度会大于  $1.37 \times 10^{-3}$ 。

AIM 气候模式为中间稳定型路径, 又称亚太综合模式, 该模式考虑了人口、未来预期的 GDP、效率改善和能源消耗 (包括煤、石油、天然气和生物能源等), 情景设计中大气辐射强度为  $6 \text{ W/m}^2$ , 可认为大气中  $\text{CO}_2$  浓度将会大于  $8.50 \times 10^{-4}$ , 代表世界各国未尽全力实现温室气体减量的目标, 发达国家和发展中国家温室气体排放不同程度地上升。

本文分别采用不同气候模式下对应的  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  土地利用需求数据, 将其叠加裁剪并统计挠力河流域各土地利用类型面积, 以此作为气候模式情景下的 FLUS 模型中土地需求参数。通过修改输入图层和调整模型参数实现不同情景下的土地利用变化模拟。

### 2.2.2 空间驱动力

直接或间接驱动因子都有可能成为土地利用变化不稳定的根源, 挠力河流域产业以农业种植和加工为主, 土地利用变化驱动因子的选择应更多围绕耕地变化机制。本文根据挠力河流域实际状况、FLUS 模型的因子需求和研究目的, 分别从影响耕地变化的自然要素、区位条件和社会经济要素 3 个方面选取驱动因子, 即: 地貌、高程、坡度、降雨量、积温条件、水田化程度 (水田比例系数)、距河流距离、距城镇中心距离、距居民点距离、距主要公路距离、距铁路距离、灌溉投资额度、基本建设投资额度、农业人口比例、沟渠密度和地下水可开采模数 16 个驱动因子。其中距离因子均为欧式距离, 利用 ArcGIS 的 Euclidian Distance 工具实现。所有驱动因子均经 min-max 离差标准化的线性变换处理, 使结果落在  $[0, 1]$  区间。需要说明的是, 作为三江平原地区核心的粮食产区之一, 以农业种植及粗加工为主的第一产业是挠力河流域的支柱性产业, 仅西部 3 区 (宝山区、尖山区和四方台区) 存在少量的工矿开采以及加工业等第二产业, 由于农业本身的特殊性以

及该流域在国家商品粮政策供应中的地位, GDP、产业发展程度等经济指标对该流域耕地利用变化的差异性驱动作用较小, 因此未选取该类型驱动因子。在进行样本训练采样的基础上, 基于各驱动因子进行神经网络训练, 最终得到各土地利用类型的适宜性概率(图4)。

### 2.2.3 模拟精度验证

模型的验证可以用来检验模拟的情况和调整模拟参数。Kappa 系数常用来评价遥感的分类精度、

图件间相似程度, 能够定量反映土地利用变化模拟过程中丢失的信息量。以基期年为初期, 模拟目标年土地利用情况, 进行 Kappa 系数的检验, 其中 Kappa 系数公式为

$$Kappa = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (5)$$

式中  $P_o$ ——正确模拟的比例

$P_c$ ——随机情况下期望的正确模拟比例

$P_p$ ——理想分类情况下的正确模拟比例  
(100%)

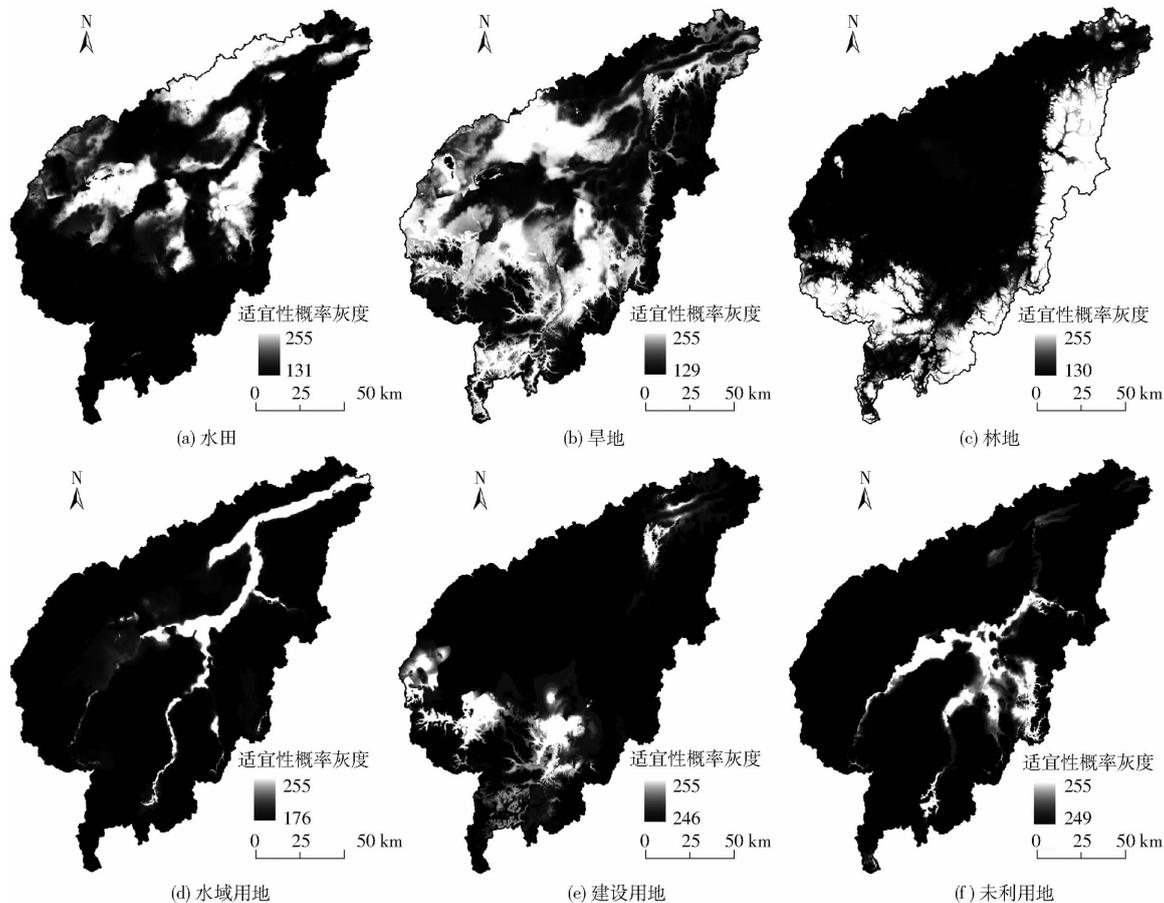


图4 基于 ANN 模型的挠力河流域各土地利用类型的适宜性概率

Fig. 4 Suitability probability of land use types based on ANN model in Naoli River Basin

当 Kappa 系数大于 0.75 时, 图件间一致性较高, 变化相对较小, Kappa 系数处于 0.4 和 0.75 之间时, 一致性一般, 变化较为明显, Kappa 系数小于 0.4 时, 模拟效果差。

## 3 结果与分析

### 3.1 耕地变化特征分析

#### 3.1.1 耕地数量变化特征

挠力河流域平原区地势平坦低洼, 极易出现农田积涝现象, 从 20 世纪 90 年代起, 当地政府大力推行以稻治涝农业结构调整政策, 大量低洼旱地改造为水田。1990—2002 年, 旱地面积由  $104.32 \text{ km}^2$  增加到  $105.55 \text{ km}^2$ , 相对面积比例由 44.05% 变为

44.57%。相对旱地而言, 期间水田变化幅度较大, 12 a 间面积增加  $28.97 \text{ km}^2$ , 达到  $48.62 \times 10^2 \text{ km}^2$ , 相对面积比例由 8.30% 上升至 20.53%, 增加了 12.23 个百分点, 变化主要集中于内外七星河上游沿岸和挠力河中游部分地区(图 5)。由于前期水田的过度扩张, 导致挠力河流域开始出现土壤盐渍化、农田水资源供应严重不足、地下水位下降和生态环境破坏等问题, 逐渐引起了当地政府关注, 水田扩张的主观意识逐渐淡化, 当地政府开始逐步引导居民科学合理开发与管理水田; 同时挠力河流域水田化的初衷在于“以稻治涝”和经济利益, 进入 21 世纪以来, 随着“两江一湖”改造和“高标准基本农田建设”等农田工程措施的陆续实施, 涝害的潜在发生

风险明显下降,由于水田的管理投入水平高于旱地,随着近年来农业基础投入要素成本的提高,水田和旱地之间的利益剪刀差逐渐缩小,旱地改造为水田的利益诉求明显下降。至 2014 年,挠力河流域水田

仅增加了  $7.21 \times 10^2 \text{ km}^2$ , 年变化率 1.19%, 且变化多集中于挠力河下游北岸。旱地轻微下降,由 2002 年的  $105.55 \text{ km}^2$  降至 2014 年  $99.70 \text{ km}^2$ , 相对面积比例变为 42.10%。

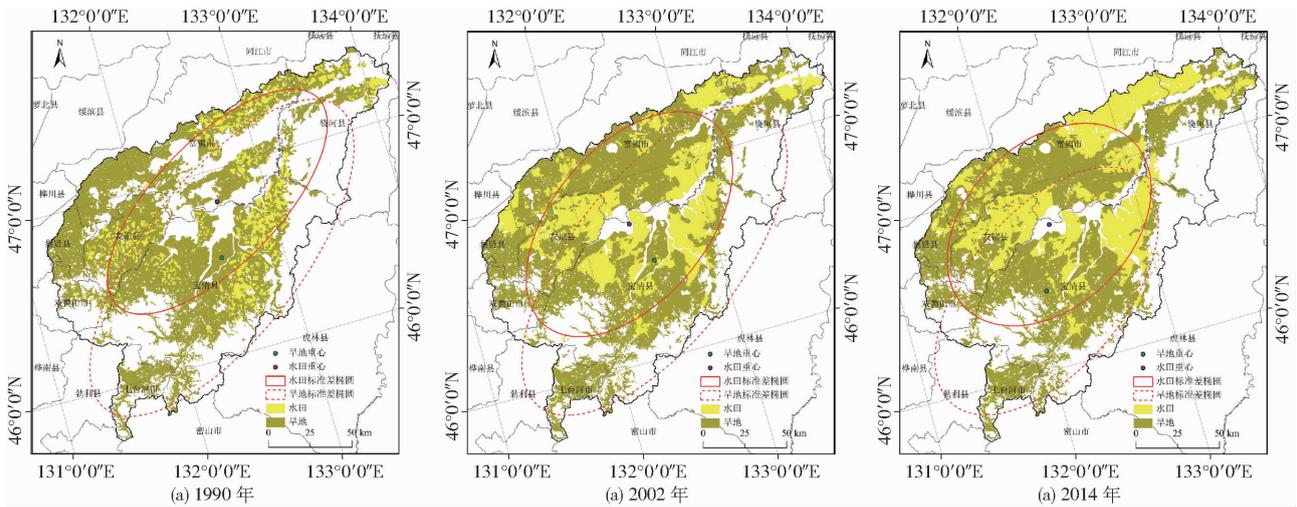


图 5 挠力河流域 3 个时点耕地分布图

Fig. 5 Cultivated land distribution maps in 1990, 2002 and 2014

### 3.1.2 耕地空间变化特征

3 个时点上,挠力河流域旱地的标准差椭圆主轴沿东北-西南方向进行分布,且辅轴一致为西北-东南走向,反映了 1990 年、2002 年和 2014 年该地区旱地的分布趋势均为东北-西南轴,旱地在东北-西南方向上的分布较西北-东南更为密集(图 5)。研究期内,旱地的标准差椭圆主轴沿顺时针方向缓慢旋转,转角  $\theta$  由  $37.53^\circ$  变为  $39.49^\circ$ , 方向性分布特征稳定;形状指数体现了空间格局的综合极化特征。受当地水田化作用的影响,部分低洼易涝旱地逐渐改造为水田,旱地分布趋于离散化,导致沿辅轴的标准差逐渐增加,由 1990 年的  $41.27 \text{ km}$  变为  $53.37 \text{ km}$ 。沿主轴标准差的变化特点恰好与辅轴相反,1990 年为  $114.76 \text{ km}$ , 后持续下降至 2014 年的  $88.50 \text{ km}$ , 二者综合导致椭圆形状指数由 1990 年的  $0.41$  增至 2014 年的  $0.53$ , 极化特征不突出;尽管挠

力河流域旱地格局变化较为随机和离散,但其空间分布范围逐渐减少。本文在标准差椭圆分析中,将标准差级数设置为 1 级,即可将约 68% 的旱地包含在椭圆内,并对 3 个时点旱地标准差椭圆面积进行统计:1990 年标准差椭圆面积达到  $17\,071.80 \text{ km}^2$ , 2002 变为  $17\,533.20 \text{ km}^2$ , 变化幅度较小,挠力河下游北部沿岸受水田化作用的影响,旱地整体分布更为集聚,2014 年旱地的标准差椭圆面积变为  $13\,130.92 \text{ km}^2$ ;重心对应着旱地空间分布位置,挠力河流域旱地整体往西南方向进行偏移,但不同时间段表现出不同的偏移特征:1990—2002 年,该流域土地利用变化剧烈,但旱地整体偏移幅度较小,重心由 1990 年的 ( $132^\circ 30' 58'' \text{ E}$ ,  $46^\circ 31' 47'' \text{ N}$ ) 变为 ( $132^\circ 29' 45'' \text{ E}$ ,  $46^\circ 31' 20'' \text{ N}$ ), 向西北向移动了  $4.2 \text{ km}$ , 至 2014 年,偏移速度加快,重心移动了  $14.57 \text{ km}$ , 变为 ( $132^\circ 7' 26'' \text{ E}$ ,  $46^\circ 25' 25'' \text{ N}$ ) (表 1)。

表 1 挠力河流域 3 个时点耕地标准差椭圆统计

Tab. 1 Standard deviation ellipsoid statistics of cultivated land in Naoli River Basin in 1990, 2002 and 2014

年份	空间重心	转角 $\theta$ / ( $^\circ$ )	沿主轴标准差/km	沿辅轴标准差/km	形状指数	椭圆面积/ $\text{km}^2$	
1990 年	旱地	$132^\circ 30' 58'' \text{ E}$ , $46^\circ 31' 47'' \text{ N}$	37.53	114.76	47.36	0.41	17 071.80
	水田	$132^\circ 36' 10'' \text{ E}$ , $46^\circ 49' 43'' \text{ N}$	43.93	86.94	37.34	0.43	10 198.41
2002 年	旱地	$132^\circ 29' 45'' \text{ E}$ , $46^\circ 31' 20'' \text{ N}$	38.27	112.08	49.80	0.44	17 533.20
	水田	$132^\circ 29' 45'' \text{ E}$ , $46^\circ 31' 20'' \text{ N}$	39.83	79.31	46.38	0.58	11 555.19
2014 年	旱地	$132^\circ 7' 26'' \text{ E}$ , $46^\circ 25' 25'' \text{ N}$	39.49	88.50	47.23	0.53	13 130.92
	水田	$132^\circ 17' 4'' \text{ E}$ , $46^\circ 45' 57'' \text{ N}$	45.31	71.09	49.20	0.69	10 988.73

水田的空间分布特征与旱地差异较大。水田是挠力河流域最主要的土地利用变化类型,其空间格局表现出较强的阶段性变化特征。研究期内,其主轴走向变化幅度大,1990年转角 $\theta$ 为 $43.93^\circ$ ,沿东北-西南方向进行分布,水田在东北-西南方向上的分布较西北-东南更为密集。在随后12 a间,挠力河流域的七星河地区和挠力河中部干流东岸水田大量扩张,水田面积的急剧增加促使椭圆主轴沿逆时针旋转,2002年转角 $\theta$ 降为 $39.83^\circ$ 。但随着流域水田逐渐向挠力河的下游北岸地区进行偏移,2014年转角 $\theta$ 变为 $45.31^\circ$ ;水田的标准差椭圆主、辅轴变化特点与旱地类似,辅轴的标准差持续增加,由1990年的37.34 km变为49.20 km,而沿主轴标准差由1990年的86.94 km降至71.09 km,水田的形状指数由1990年的0.43逐渐增至2002年的0.58,2014年则变为0.69,反映了水田整体离散性增加,极化特征趋于弱化;椭圆的面积统计结果显示,挠力河流域3个研究时点的水田分布范围基本一致,椭圆面积均表现出先增加后减少的特点,变化幅度较小;相对旱地而言,水田重心的偏移幅度较小,由1990年的( $132^\circ36'10''\text{E}, 46^\circ49'43''\text{N}$ )缓慢移至2014年的( $132^\circ17'4''\text{E}, 46^\circ45'57''\text{N}$ ),呈现出向西南方向偏移的特征。值得一提的是,水资源是北方寒地农业的核心限制性要素,从基于地表起伏等综合状况划分的封闭型流域单元出发来制定耕地管理策略,更利于耕地的水分利用管理,进而采取科学的农田灌溉措施和耕地调整对策,研究挠力河流域的耕地变化与利用问题将对三江平原地区具有较强的示范导向作用。然而挠力河流域是三江平原境内土地利用开发历史最早、耕地利用与管理手段最为成熟的地区,特别是自2000年以来该地区陆续建立多个国家级湿地自然保护区,土地利用结构相对稳定,差别于三江平原其他地区的土地利用特点。研究显示,挠力河流域的水田整体偏移特征恰好与三江平原水田“北移东扩”的整体特征相反,因此未来需根据三江平原的地区特点差异性制定差别化的耕地管理策略,对于三江平原北部仍处于扩张状态的水田应尽量保障其粮食生产能力,而水田发展成熟的挠力河流域应在保证其粮食可持续生产的前提下,关注水田开发利用中的生态环境问题。由于水稻需水量(657.70 mm)远大于旱作物需水量(456.33 mm)<sup>[30]</sup>,在旱地和水田整体均向西南方向偏移的综合作用下,挠力河流域农田需水量将急剧增加,而同时农业灌溉重心逐渐向西南方向进行移动,可以预见的是未来该流域西南方向的农田水分亏缺风险将进一步加大,次生负面环境效应进一步严峻。

### 3.2 基于 FLUS 模型的耕地动态变化模拟

#### 3.2.1 模拟时空尺度确定

土地利用情景模拟过程中,空间分辨率过低会导致零散分布的居住用地、小块水域、小块水田等土地利用类型空间边界信息的丢失,但倘若分辨率过高,由于地理学的领域效应,将会造成模拟失真,因此,需预先确定最佳模拟空间尺度。本文从1 km(栅格大小 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ )开始,以100 m为步长逐步提高空间分辨率进行土地利用模拟验证,其中模拟基期年为1990年,目标年2014年,通过Kappa系数检验确定最优模拟空间尺度。FLUS模拟结果显示,随着空间分辨率的提高,挠力河流域土地利用模拟精度表现出较强的曲线拐点效应(图6),Kappa系数在波动中上升,由1 km分辨率下0.42增至200 m下的0.86,主要拐点发生在700 m处和200 m处。因此,确定最优模拟空间尺度为200 m。

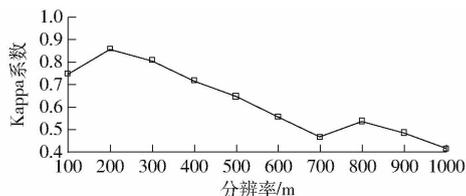


图6 挠力河流域不同分辨率下模拟的Kappa系数检验

Fig. 6 Verification of Kappa coefficient at different resolutions in Naoli River Basin

时间尺度确定上,基于挠力河流域最优模拟空间尺度,运用FLUS模型对不同时间尺度的预测能力进行分析,然后确定具体预测年份(图7)。模拟基期年依次为1990年和2002年,目标年2014年,二者对应预测年份分别为24 a和12 a,然后通过对比检验Kappa系数确定模拟时间尺度。结果显示,1990年综合模拟精度(Kappa系数为0.86)显著大于2002年模拟精度(Kappa系数为0.75),尤其在单一地类模拟上,前者对水田模拟准确率达到0.84,旱地准确率为0.89。因此,最终确定模拟目标年为2038年。

#### 3.2.2 情景模拟结果

##### (1) MESSAGE 气候模式

MESSAGE气候模式下,世界各国不采取任何减排措施,主要温室气体的排放量将会持续递增,进而促使全球平均地表温度升高和降水时空异质性增大,该气候效应对中高纬度地区的影响更为显著,导致我国东北地区增温幅度高于全球同期水平,年降水量呈略减少趋势,对该地区的农业生产和农业生态系统造成了深刻的影响。如果世界各国仍延续高碳排放量的经济发展模式,2038年东北地区耕地面积比例将减少0.82%<sup>[38]</sup>,而受国家粮食政策的影

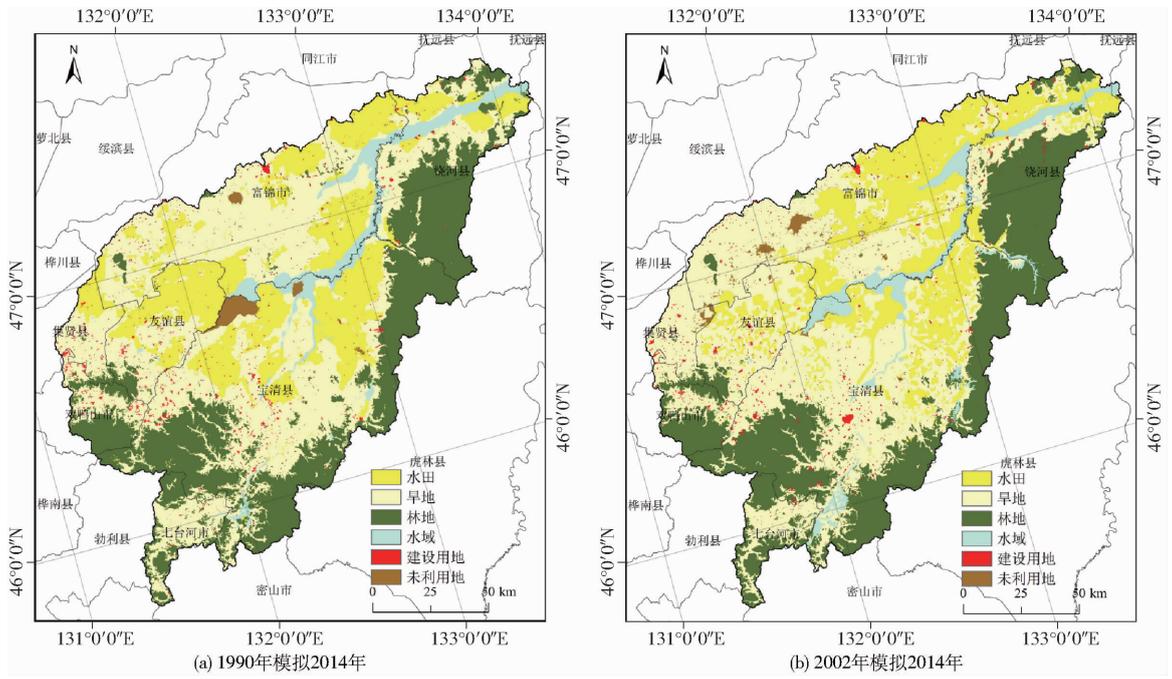


图 7 基于 FLUS 模型的挠力河流域不同时间尺度模拟结果

Fig. 7 Simulation results for different time scales based on FLUS model in Naoli River Basin

响,粮食作物种植及其粗加工是挠力河流域最主要的经济来源结构之一,建设占用耕地的需求较低,导致耕地面积仅减少 0.35%,凸显了该地区在东北地区乃至全国中的粮食战略地位。

耕地子类型上,挠力河流域旱地先表现出稳定的面积减少态势,至 2029 年约下降 9.18%,随后缓慢增加。空间分布上,2038 年旱地的标准差椭圆主轴将沿逆时针进行旋转,转角  $\theta$  变为  $35.43^\circ$ ,主、辅轴的标准差均缓慢增加,其中沿主轴标准差由 2014 年的 88.50 km 变为 2038 年的 94.39 km,辅轴变为 49.16 km,形状指数缓慢下降,变为 0.52,离散化特征趋弱。标准差椭圆的面积将增至  $14\,578\text{ km}^2$ ,反映了在该气候模式下,未来挠力河流域旱地的分布范围将更广,旱地倾向于沿东北-西南主轴进行分布。

水田变化特征与旱地相反,面积先持续以较低的速度增加,在 2029 年之后面积将以 2% 的速度逐年减少。未来挠力河流域的水田将沿顺时针进行旋

转,2038 年其转角  $\theta$  增至  $57.16^\circ$ 。沿主轴标准差由 2014 年的 71.09 km 降为 70.02 km,辅轴标准差下降幅度较大,由 2014 年的 49.20 km 变为 43.13 km。在二者综合作用下,未来挠力河流域的水田的标准差椭圆形状指数将降至 0.62,标准差椭圆面积变为  $9\,486.73\text{ km}^2$ ,与 2014 年比较可知,未来水田整体分布将更加紧凑,并沿顺时针缓慢旋转,极化特征明显,但其空间分布重心 ( $132^\circ 25' 30''\text{E}$ ,  $46^\circ 52' 14''\text{N}$ ) 偏移幅度非常小(图 8 和表 2)。

(2) AIM 气候模式

与 MESSAGE 气候模式相比,AIM 气候模式下的气候波动更加明显,在世界各国未全力实现碳减排目标的背景下,东北地区耕地面积将持续增加,至 2038 年面积比例增加幅度约为 4.0%<sup>[36]</sup>。挠力河流域处于全球气候变化突出的纬度位置,邻近我国水稻种植北界,气候波动过大将会对当地作物种植造成显著的负面影响,导致耕作自然要素条件变差,

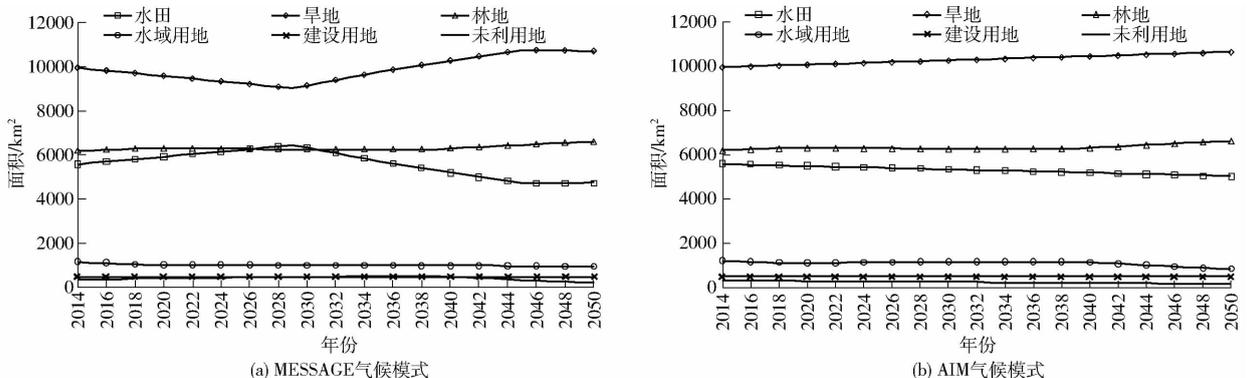


图 8 不同气候模式下挠力河流域土地利用结构变化情况

Fig. 8 Land use change in Naoli River Basin based on MESSAGE mode and AIM mode

表2 不同气候模式下挠力河流域耕地标准差椭圆统计(2038年)

Tab.2 Standard deviation ellipsoid statistics of cultivated land under MESSAGE mode and AIM mode

RCPs 气候模式	空间重心	转角 $\theta$ / ( $^{\circ}$ )	沿主轴标 准差/km	沿辅轴标 准差/km	形状指数	椭圆面积/ km <sup>2</sup>
MESSAGE	旱地	132°17'43"E, 46°33'52"N	35.43	94.39	0.52	14 578.00
	水田	132°25'30"E, 46°52'14"N	57.16	70.02	0.62	9 486.73
AIM	旱地	132°17'12"E, 46°36'6"N	39.48	89.54	0.55	13 907.80
	水田	132°26'22"E, 46°45'49"N	35.76	76.82	0.59	10 870.70

在 AIM 气候模式下挠力河流域耕地面积增加速度远小于东北地区,2038 年其面积仅增加 0.46%。

气候波动对挠力河流域的水田的影响程度远大于旱地,AIM 气候模式下旱地面积将缓慢上升,至 2038 年相对面积比例上升 2.53%,其空间格局变化幅度较小,转角  $\theta$  基本保持不变,沿主轴标准差缓慢增至 89.54 km,沿辅轴标准差也将变为 49.44 km,形状指数由 2014 年的 0.53 变为 0.55,标准差椭圆

面积变为 13 907.8 km<sup>2</sup>,旱地空间分布将更加离散。

不同于 MESSAGE 气候模式,AIM 气候模式下水田面积将维持波动下降的趋势,由 2014 年的  $55.83 \times 10^2$  km<sup>2</sup> 降至 2038 年的  $51.03 \times 10^2$  km<sup>2</sup>,并沿逆时针进行旋转。水田沿主轴标准差增加为 76.82 km,辅轴降为 45.04 km,二者综合作用下将导致水田空间分布格局更加极化(形状指数降为 0.59),然而与 2014 年水田的整体分布范围仍保持一致(图 9)。

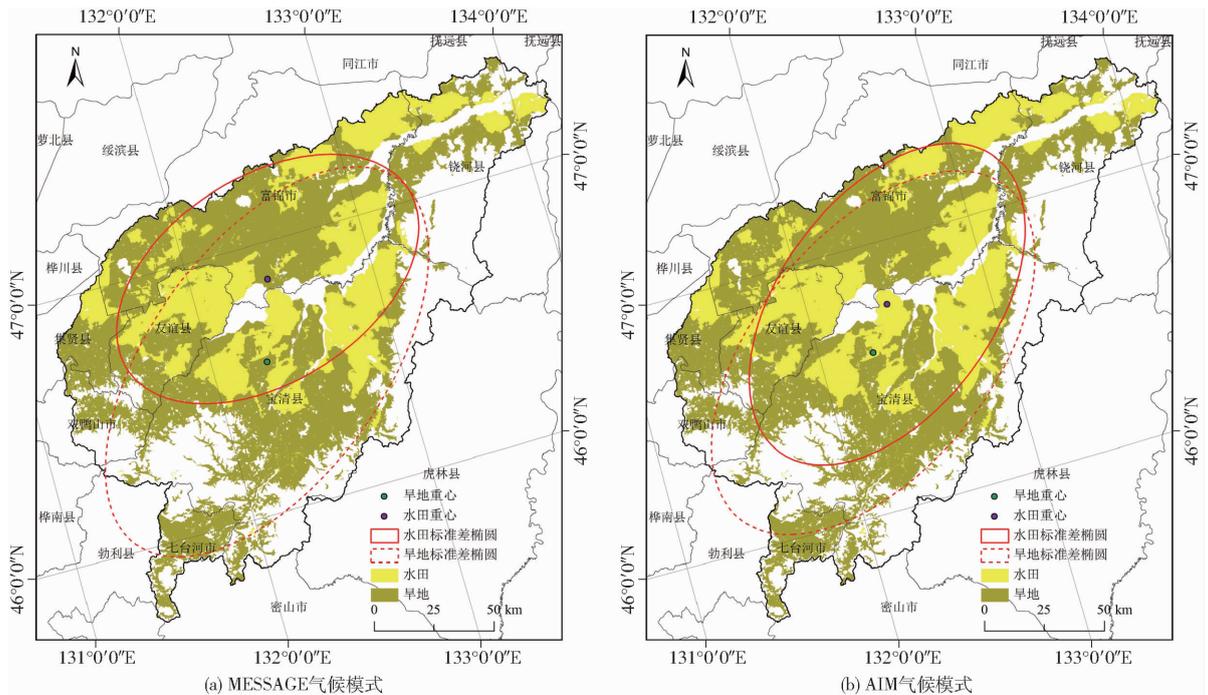


图9 MESSAGE 气候模式和 AIM 气候模式下挠力河流域耕地空间特征

Fig.9 Spatial distribution characteristics in Naoli River Basin based on MESSAGE mode and AIM mode

## 4 讨论

(1)为坚守国家  $1.2 \times 10^8$  hm<sup>2</sup> 耕地红线,我国长期实行耕地占补平衡政策,即非农建设经批准占用耕地要按照“占多少,补多少”的原则,补充数量和质量相当的耕地。在我国耕地后备资源逐渐开发殆尽的背景下,耕地占补平衡政策对保障我国耕地数量起到了巨大的作用。大量优质耕地被建设占用,而劣质耕地的粮食生产能力难以得到保证,甚至出现弃荒情形,另一方面,地方政府将大量的劣质耕地、超坡耕地等生产能力难以得到保障的土地以耕地类型进行上报,综合导致耕地的“真正”数量难以

得到保证。国土资源统计公报显示,近几年来我国耕地面积开始轻微下降,耕地数量以及质量的真正保护压力应更为严峻。三江平原地区是我国重要的粮食垦区,农业和工业的剪刀差导致该地区经济发展滞后,耕地被建设占用的需求较低,三江平原地区工矿废弃地较多,未利用地资源丰富,仍存在一定面积数量的耕地后备资源,特别是 21 世纪以来该地区耕地面积持续增加,三江平原地区在保障我国粮食安全中的战略地位将愈加凸显。

(2)挠力河流域是三江平原最为典型的流域之一,域内共 7 个县(区),农区与垦区并存,耕地利用系统驱动复杂。自 1980 年国家进入经济迅速发展

时期后,流域出现大量的湿地开垦为耕地、水利工程修建和农业结构调整等现象,导致湿地大面积丧失、结构破坏和功能退化。特别是 1990 年以来,挠力河流域耕地空间急剧扩张和水田面积及结构比率的持续上升,水田是其最主要的土地利用变化景观。本文依据 IPCC 第 5 次评估报告中发布的典型浓度路径下不同气候模式数据,估算了区域水平不同气候模式下的土地利用需求量,实现了与国际相关研究的完好链接,为相关领域的国际交流与合作奠定了基础。以 Landsat 影像、DEM 数据和社会经济统计资料等多源数据为基本信息源,结合遥感和 GIS 技术,引入 FLUS 模型定量模拟 RCPs 气候排放情景下我国典型的中高纬度流域耕地动态变化格局,可以为挠力河流域乃至三江平原的耕地适应性调整提供科学依据。

(3) 考虑到耕地是粮食生产的最基本物质资料,而水资源是耕地资源开发与利用的前提条件,在降水减少和积温上升的气候变化综合作用下,水土资源供需矛盾势必会越来越突出,对其水土资源平衡关系研究将有助于耕地布局方案的科学制定和农业生产的合理调整。特别是近年来,挠力河流域水田急剧扩张,由此导致当地农田需水量急剧增加,而降水可被认为是供水来源的唯一途径,而未来该流域降水将缓慢减少,水分供需缺口越来越大,在探寻未来该地区耕地调整策略中,需在研究耕地资源变化的前提下,从天然状态下探寻水、土二者资源之间的耦合机理,并通过耕地调整(数量及结构调整)实现水土资源平衡以适应全球气候变化。

## 5 结论

(1) 20 世纪 90 年代起,挠力河流域大力推行旱

改水政策,大量低洼旱地改造为水田,旱地和水田变化特征差异大:旱地面积比例由 1990 年的 44.05% 缓慢增至 2002 年的 44.57%,期间内水田变化极其剧烈,比例由 8.30% 变为 20.53%,且变化多集中于内外七星河上游沿岸和挠力河中游部分地区。至 2014 年,旱地面积轻微下降,水田面积仅增加  $7.21 \times 10^2 \text{ km}^2$ 。

(2) 3 个时点上,挠力河流域的旱地均沿东北-西南轴分布,主轴缓慢沿顺时针旋转,方向性特征稳定,但其分布更加离散,分布范围逐渐减少,旱地的重心向西南方向进行偏移;与旱地相比,水田分布格局的阶段特征更加突出,基本沿东北-西南方向进行分布,主轴先逆时针进行旋转,后顺时针旋转至  $45.31^\circ$ 。水田分布较为离散,极化特征趋于弱化,其重心偏移幅度较小。

(3) 通过检验不同空间尺度和时间尺度下的模拟精度确定合理的模拟栅格大小和目标年份,确定最优模拟空间尺度为 200 m,模拟目标年为 2038 年。模拟结果显示,MESSAGE 气候模式下,挠力河流域耕地面积将减少 0.35%,旱地面积先减少后增加,水田先稳定上升,随后以约 2% 的速度下降。水田的空间格局将更加紧凑,主轴沿顺时针缓慢旋转,整体仍倾向于沿东北-西南走向进行分布,极化特征突出,且其重心位移幅度较小;在 AIM 气候模式下,耕地面积仅增加了 0.46%,其中旱地面积缓慢增加,至 2038 年相对面积比例上升了 2.53%,水田面积缓慢下降,但其综合极化特征更加突出,气候波动对水田的影响程度明显大于旱地。未来需根据三江平原地区的差异性特点制定差别化的耕地管理策略,重点关注该地区由于水田开发利用所导致的生态环境问题。

## 参 考 文 献

- 1 SHI Wenjiao, TAO Fulu, LIU Jiyuan, et al. Has climate change driven spatio-temporal changes of cropland in Northern China since the 1970s? [J]. *Climatic Change*, 2014, 124: 163 - 177.
- 2 YE Yu, FANG Xiuqi, AFTAB U K. Migration and reclamation in northeast China in response to climatic disasters in North China over the past 300 years [J]. *Regional Environmental Change*, 2012, 12(1): 193 - 206.
- 3 赵文武. 世界主要国家耕地动态变化及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6452 - 6462.  
ZHAO Wenwu. Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20): 6452 - 6462. (in Chinese)
- 4 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析 [J]. *地理学报*, 2009, 64(12): 1411 - 1420.  
LIU Jiyuan, ZHANG Zengxiang, XU Xinliang, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1411 - 1420. (in Chinese)
- 5 SONG Xiaoqing, OUYANG Z, LI Yunsheng, et al. Cultivated land use change in China, 1999—2007: policy development perspectives [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(6): 1061 - 1078.
- 6 ZHONG Taiyang, HUANG Xianjing, ZHANG Xiuying, et al. Temporal and spatial variability of agricultural land loss in relation to policy and accessibility in a low hilly region of Southeast China [J]. *Land Use Policy*, 2011, 28(4): 762 - 769.
- 7 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 [J]. *地理学报*, 2015, 70(9): 1463 - 1476.

- SHI Xiaoli, SHI Wenjiao. Identifying contributions of climate change and human activities to spatial-temporal cropland changes: a review[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1463 – 1476. (in Chinese)
- 8 CHEN Changqing, QIAN Chunrong, DENG Aixing, et al. Progressive and active adaptations of cropping system to climate change in Northeast China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 38: 94 – 103.
- 9 PIAO Shilong, CIAIS P, HUANG Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467: 43 – 51.
- 10 DONG Jinwei, LIU Jiyan, TAO Fulu, et al. Spatio-temporal changes in annual accumulated temperature in China and the effects on cropping systems, 1980s to 2000[J]. *Climate Research*, 2009, 40(1): 37 – 48.
- 11 姜群鹤, 邓祥征, 柯新利, 等. RCPs 气候情景下珠江三角洲地区城市用地扩展的预测与模拟[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3627 – 3636.
- JIANG Qunou, DENG Xiangzheng, KE Xinli, et al. Prediction and simulation of urban area expansion in Pearl River Delta Region under the RCPs climate scenarios[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3627 – 3636. (in Chinese)
- 12 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等. 四川盆地大都市边缘区土地利用时空格局模拟: 以资阳市雁江区为例[J]. *地理科学*, 2013, 33(12): 1524 – 1530.
- DENG Hui, HE Zhengwei, CHEN Ye, et al. The land use spatio-temporal pattern simulation in Metropolitan Fringe of the Sichuan Basin: a case study in Yanjiang District, Ziyang City, Sichuan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 33(12): 1524 – 1530. (in Chinese)
- 13 邓华, 邵景安, 王金亮, 等. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J]. *地理学报*, 2016, 71(11): 1979 – 1997.
- DENG Hua, SHAO Jing'an, WANG Jinliang, et al. Land use driving forces and its future scenario simulation in the Three Gorges Reservoir Area using CLUE – S model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1979 – 1997. (in Chinese)
- 14 周成虎, 欧阳, 马廷, 等. 地理系统模拟的 CA 模型理论探讨[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(6): 833 – 838.
- ZHOU Chenghu, OU Yang, MA Ting, et al. Theoretical perspectives of CA-based geographical system modeling[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(6): 833 – 838. (in Chinese)
- 15 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 等. 复杂系统理论与 Agent 模型在土地变化科学中的研究进展[J]. *地理学报*, 2011, 66(11): 1518 – 1530.
- YU Qiangyi, WU Wenbin, TANG Huajun, et al. Complex system theory and Agent-based modeling: progresses in land change science[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1518 – 1530. (in Chinese)
- 16 魏云洁, 甄霖, 邓祥征, 等. 中国生物能源政策情景对土地利用格局的影响[J]. *资源科学*, 2009, 31(4): 552 – 558.
- WEI Yunjie, ZHEN Lin, DENG Xiangzheng, et al. Scenario analysis on land use patterns in China based on bioenergy development from 2010 to 2025[J]. *Resources Science*, 2009, 31(4): 552 – 558. (in Chinese)
- 17 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 183 – 189.
- PAN Tao, WU Shaohong, DAI Erfu, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 183 – 189. (in Chinese)
- 18 周浩, 雷国平, 赵宇辉, 等. 基于 CA – Markov 模型的挠力河流域土地利用动态模拟[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 252 – 258.
- ZHOU Hao, LEI Guoping, ZHAO Yuhui, et al. Simulation of dynamics of land use in naoli river valley based on CA – Markov model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(2): 252 – 258. (in Chinese)
- 19 杨建新, 龚健, 李江风. 基于 LSSVM – CA 模型的复杂土地利用变化模拟: 以鄂州市为例[J]. *资源科学*, 2016, 38(8): 1525 – 1537.
- YANG Jianxin, GONG Jian, LI Jiangfeng. Complex land use changes simulation in Ezhou City using cellular automata based on least squares support vector machine[J]. *Resources Science*, 2016, 38(8): 1525 – 1537. (in Chinese)
- 20 李丹, 黎夏, 刘小平, 等. GPU – CA 模型及大尺度土地利用变化模拟[J]. *科学通报*, 2012, 57(11): 959 – 969.
- LI Dan, LI Xia, LIU Xiaoping, et al. Land use changes simulation based on the GPU – CA model[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(11): 959 – 969. (in Chinese)
- 21 李婧怡, 林坚, 刘松雪, 等. 2014 年土地科学研究重点进展评述及 2015 年展望: 土地利用与规划分报告[J]. *中国土地科学*, 2015, 29(3): 3 – 12.
- LI Jingyi, LIN Jian, LIU Songxue, et al. Progress review on land sciences research in 2014 and prospects for 2015: sub-report of land use and planning[J]. *China Land Sciences*, 2015, 29(3): 3 – 12. (in Chinese)
- 22 LI Xia, CHEN Yimin, LIU Xiaoping, et al. Concepts, methodologies, and tools of an integrated geographical simulation and optimization system (GeoSOS)[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(4): 633 – 655.
- 23 陈逸敏, 黎夏, 刘小平, 等. 基于耦合地理模拟优化系统 GeoSOS 的农田保护区预警[J]. *地理学报*, 2010, 65(9): 1137 – 1145.
- CHEN Yimin, LI Xia, LIU Xiaoping, et al. Coupling geosimulation and optimization (GeoSOS) for zoning and alerting of agricultural conservation areas[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1137 – 1145. (in Chinese)
- 24 黎夏, 刘小平, 何晋强, 等. 基于耦合的地理模拟优化系统[J]. *地理学报*, 2009, 64(8): 1009 – 1018.
- LI Xia, LIU Xiaoping, HE Jinqiang, et al. A geographical simulation and optimization system based on coupling strategies[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 1009 – 1018. (in Chinese)

- 25 吴海燕, 孙甜田, 范作伟, 等. 东北地区主要粮食作物对气候变化的响应及其产量效应[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 299-307.  
WU Haiyan, SUN Tiantian, FAN Zuowei, et al. The major food crops in response to climate change and its yield effect in Northeast of China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(4): 299-307. (in Chinese)
- 26 NEWMAN M E, MCLARN K P, WILSON B S. Long-term socio-economic and spatial pattern drivers of land cover change in a Caribbean tropical moist forest, the Cockpit Country, Jamaica. Agriculture[J]. Ecosystems & Environment, 2014, 186:185-200.
- 27 胡琦, 潘学标, 张丹, 等. 东北地区不同时间尺度下气温和无霜期的变化特征[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 1-8.  
HU Qi, PAN Xuebiao, ZHANG Dan, et al. Variation of temperature and frost-free period in different time scales in Northeast China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 1-8. (in Chinese)
- 28 云雅如, 方修琦, 王媛, 等. 黑龙江省过去 20 年粮食作物种植格局变化及其气候背景[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 697-705.  
YUN Yaru, FANG Xiuqi, WANG Yuan, et al. Main grain crops structural change and its climate background in Heilongjiang Province during the past two decades[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(5): 697-705. (in Chinese)
- 29 段居琦, 周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 218-227.  
DUAN Juqi, ZHOU Guangsheng. Climatic suitability of double rice planting regions in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(2): 218-227. (in Chinese)
- 30 周浩, 雷国平, 张博, 等. 1990—2013 年挠力河流域耕地变化下水土资源平衡效应分析[J], 农业工程学报, 2015, 31(1): 272-280.  
ZHOU Hao, LEI Guoping, ZHANG Bo, et al. Farmland change induced land and water resource balance in Naoli River Basin from 1990 to 2013[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 272-280. (in Chinese)
- 31 周浩, 雷国平, 杨雪昕. 三江平原典型流域土地利用格局变化与空间分异研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 142-151. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170517&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170517&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.017  
ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin. Land use change pattern and its spatial differentiation in the typical basin of Sanjiang Plain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 142-151. (in Chinese)
- 32 杜国明, 李昀, 于凤荣, 等. 基于遥感的 2000—2009 年三江平原北部耕地变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 225-229.  
DU Guoming, LI Yun, YU Fengrong, et al. Change characteristics analysis of farmland in Northern Sanjiang Plain in 2000—2009 based on remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 225-229. (in Chinese)
- 33 刘正茂. 近 50 年来挠力河流域径流演变及驱动机制研究[D]. 吉林: 东北师范大学, 2012.  
LIU Zhengmao. Study on runoff evolution and its driving mechanism of Naoli River Basin in recent 50 years [D]. Jilin: Northeast Normal University, 2012. (in Chinese)
- 34 刘贵花. 三江平原挠力河流域水文要素变化特征及其影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
LIU Guihua. Changes of hydrological elements and effects of the Naoli River watershed in the Sanjiang Plain, Northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy Sciences, 2013. (in Chinese)
- 35 宋晓林. 1950s 挠力河流域径流特征变化及其影响因素[D]. 吉林: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2012.  
SONG Xiaolin. Variation of hydrological regimes and its driving forces of Naolin River since 1950s [D]. Jilin: Northeast Institute of Geograph and Agroecology, Chinese Academy Sciences, 2012. (in Chinese)
- 36 高超, 张正涛, 陈实, 等. RCP4.5 情景下淮河流域气候变化的高分辨率模拟[J]. 地理研究, 2014, 33(3): 467-477.  
GAO Chao, ZHANG Zhengtao, CHEN Shi, et al. The high-resolution simulation of climate change model under RCP4.5 scenarios in the Huaihe River Basin[J]. Geographical Research, 2014, 33(3): 467-477. (in Chinese)
- 37 韩乐琼, 韩哲, 李双林. 不同代表性浓度路径(RCPs)下 21 世纪长江中下游强降水预估[J]. 大气科学学报, 2014, 37(5): 529-540.  
HAN Leqiong, HAN Zhe, LI Shuanglin. Projection of heavy rainfall events in the middle and lower reaches of the Yangtze river valley in the 21st century under different representative concentration pathways[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(5): 529-540. (in Chinese)
- 38 姜群鸣, 谭蓓, 薛筱婵, 等. 气候情景下典型开垦与退耕区耕地动态变化的定量模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 271-280.  
JIANG Qunou, TAN Bei, XUE Xiaochan, et al. Quantitative modeling changes in area of reclamation and returning cultivated land to forest or pastures under representative concentration pathways (RCPs) climate scenarios[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 271-280. (in Chinese)