

DOI: 10.5846/stxb201911022309

路中,雷国平,郭一洋,马泉来. 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响. 生态学报, 2021, 41(5): 1894-1906.

Lu Z, Lei G P, Guo Y Y, Ma Q L. Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1894-1906.

# 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响

路中<sup>1</sup>, 雷国平<sup>1,\*</sup>, 郭一洋<sup>1</sup>, 马泉来<sup>2</sup>

1 东北大学土地管理研究所, 沈阳 110169

2 河南省资源环境调查一院, 郑州 450000

**摘要:** 土地利用/覆盖变化通过改变地面反射率对区域气候产生直接的影响, 探究不同空间尺度下土地利用/覆盖变化对气候因子的影响具有重要意义。基于人机交互式方式提取松嫩平原土地利用信息, 利用 Matlab 编程方式获取研究区域内 1985—2015 年间不同空间尺度土地利用强度变化情况, 研究不同空间尺度下松嫩平原土地利用强度时空变化特征及其对气候因子的影响。研究结论: ① 不同空间尺度的土地利用强度的均值分别为 3.92、3.92、3.93、3.93 以及 4.34, 均值呈现逐渐增加的变化趋势; ② 1980—2018 年间松嫩平原年平均降水量呈现下降的趋势, 其下降的变化率为  $-9.89 \text{ mm}/10 \text{ a}$ , 年平均温度变化呈现上升的趋势, 其上升的变化率为  $0.256 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ; ③ 松嫩平原土地利用强度与降水之间呈现负相关, 即对降水量增加表现为抑制作用, 与温度之间呈现较为明显的正相关, 即对温度的增加表现为促进作用, 且随着空间尺度不断增加其抑制或促进作用均表现为先增强后减弱的变化趋势; ④ 偏相关和复相关分析知, 松嫩平原土地利用强度与降水、温度呈现明显的相关性, 且 10 km 网格空间尺度上土地利用强度对区域气候的作用表现得更为明显。

**关键词:** 空间尺度; 土地利用强度; 松嫩平原; 气候因子

## Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors

LU Zhong<sup>1</sup>, LEI Guoping<sup>1,\*</sup>, GUO Yiyang<sup>1</sup>, MA Quanlai<sup>2</sup>

1 Land Management Institute, Northeastern University, Shenyang 110169, China

2 The First Institute of Resources and Environment Investigation of Henan province, Zhengzhou 450000, China

**Abstract:** Land use/cover change has a direct impact on regional climate by changing the surface reflectance. It is of great significance to explore the impact of land use/cover change on climatic factors at different spatial scales. In this paper, the land use information of Songnen Plain is extracted based on human-machine interaction. And, the Matlab program is used to obtain the changes in land use intensity at different spatial scales in the research area from 1985 to 2015. On this basis, the temporal and spatial characteristics of land use intensity and its influence on climate factors in Songnen Plain were studied. ① The results show that the mean values of land use intensity at different spatial scales are 3.92, 3.92, 3.93, 3.93, and 4.34, presenting a gradually increasing trend. ② From 1980 to 2018, the average annual precipitation in Songnen Plain showed a downward trend with a decline of  $-9.89 \text{ mm}$  per decade, and the annual average temperature displayed an upward trend with an increase of  $0.256 \text{ }^\circ\text{C}$  per decade. ③ There is a negative correlation between land use intensity and precipitation in Songnen Plain, which means that it can restrain the increase of precipitation. There is a significant positive

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671520)

收稿日期: 2019-11-02; 网络出版日期: 2021-01-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guopinglei@126.com

correlation between land use intensity and temperature in Songnen Plain, which means that it can promote the increase of temperature. In addition, with the increase of spatial scale, the inhibition or promotion of the effects are first enhanced and then weakened. ④ Partial correlation and multiple correlation analysis demonstrate that the land use intensity of Songnen Plain is significantly correlated with precipitation and temperature. The effect of land use intensity on regional climate is more obvious on the 10 km grid spatial scale.

**Key Words:** spatial scale; land use pattern; Songnen Plain; climate factors

土地利用/覆盖是一个综合性概念<sup>[1]</sup>,它不仅是分析和解释区域土地利用/覆盖时空变化特征、过程和机理的重要手段<sup>[2-3]</sup>,而且它对全球以及区域生态环境具有重要的影响<sup>[4-6]</sup>。已有的研究表明,在区域乃至更小的尺度上,区域生态环境(地表能量和水分收支)变化对气候的影响通常比碳排放更为直接<sup>[7]</sup>。在全球气候变暖背景下,农业适应性研究是目前全球变化科学、可持续性科学、农业生态学的研究热点问题<sup>[8]</sup>。因此,准确的测算区域土地利用/覆盖变化情况,寻求最佳的区域尺度研究土地利用/覆盖变化与区域气候变化之间的相互作用关系,对土地的合理使用、区域小气候的调节以及区域生态环境的保护具有重要的意义<sup>[9-12]</sup>。

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第5次评估报告指出,人类活动对气候系统产生明显的作用,土地利用/覆盖的变化通过改变地表反照率对地球辐射收支产生直接影响<sup>[13]</sup>。目前,关于土地利用/覆盖变化对气候的影响以前学者已经做出大量的研究,在研究角度及方法上,众多学者一方面利用气候模型模拟气候因子的数值,以此对比实际气候特征,研究LUCC变化过程及其气候效应<sup>[14-17]</sup>;另一方面学者利用土地利用强度<sup>[18]</sup>、地表蒸散发(ET)<sup>[19]</sup>、植被指数(NDVI)<sup>[20]</sup>、植被净初级生产力(NPP)<sup>[21]</sup>等指标,分析土地利用/覆盖指数与气候变化之间的相关性,探究LUCC变化对于气候因子的影响;在研究尺度上,学者多以1 km<sup>[21-22]</sup>、3 km<sup>[18,23]</sup>、10 km<sup>[24]</sup>、30 km<sup>[25-26]</sup>以及50 km<sup>[27]</sup>为评价单元,研究流域、县域、以及全国尺度下的LUCC变化及其气候效应。现有的研究为分析土地利用/覆盖与气候因子之间的关系提供了理论和实践的基础,学者从不同空间尺度来研究土地利用/覆盖变化对于局部气候的影响,但目前关于LUCC变化对气候影响的研究在土地利用/覆盖尺度效应方面研究相对较少。所谓的“尺度效应”是指对同一区域的某种地理现象在不同分辨率(不同尺度)下进行空间相关分析时,往往出现不一致性<sup>[28]</sup>。基于此,该文结合松嫩平原的实际地区特征,将研究区域划分为1 km、3 km、5 km、10 km以及20 km等若干大小不同的正方形评价单元,选用土地利用强度指标,研究不同空间尺度下土地利用强度变化对气候因子的影响,寻求两者作用的最佳空间尺度,为土地利用/覆盖变化的气候效应研究提供参考。

人类的农业开发是土地利用/覆盖变化的重要驱动力之一。松嫩平原是我国主要的粮食生产基地,为了满足当地社会经济发展的需求和国家粮食生产的要求,松嫩平原土地利用/覆盖发生显著的变化,呈现“三增四减”趋势,即耕地、城镇用地、林地的增长,而草地、未利用地、湿地和水域减少<sup>[29]</sup>,加之全球气候变暖的影响,使区域干湿格局呈现“干着越干,湿着越湿”的变化趋势<sup>[30]</sup>,加剧了研究区域的干旱状况。在气候变暖和大规模农业开发的双重压力下,探究土地利用强度时空变化与气候因子之间的内部作用机制显得尤为重要。本文运用地理信息系统、遥感技术,采用Matlab编程,测算不同时点(1985年、1995年、2005年和2015年)不同空间尺度的土地利用强度变化情况,运用“观测资料减去再分析”(Observation Minus Reanalysis, OMR)方法处理气候因子数据,利用趋势分析、相关分析法,研究1985—2015年松嫩平原土地利用强度时空变化特征及研究区域内气候因子的变化规律,重点探讨不同空间尺度的土地利用强度对气候因子的影响。

## 1 研究地区与数据来源及处理

### 1.1 研究区概况

松嫩平原位于大、小兴安岭与长白山脉及松辽分水岭之间,主要由松花江和嫩江冲积而形成,与三江平

原、辽河平原并称东北三大平原。松嫩平原位于黑龙江省的西南部,地理位置介于 121°38′—128°33′E, 42°49′—49°12′N 之间,总面积为 22.5×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。研究区域内主要气候类型为温带大陆性半湿润、半干旱季风气候,受冬夏季风的交替影响,四季气候分明,全年平均气温呈自北向南逐渐增高趋势,等值线近纬向分布,大部分地区的年降水量为 400—600 mm,自东向西逐渐减少,6—8 月降水量占全年降水量的 60%—70%,易形成干旱和洪涝灾害。松嫩平原地势平缓,土质肥沃,黑土、黑钙土占 60% 以上,其他土壤类型包括草甸土、暗棕壤、沼泽土、盐土、碱土、风砂土、栗钙土及水稻土等。

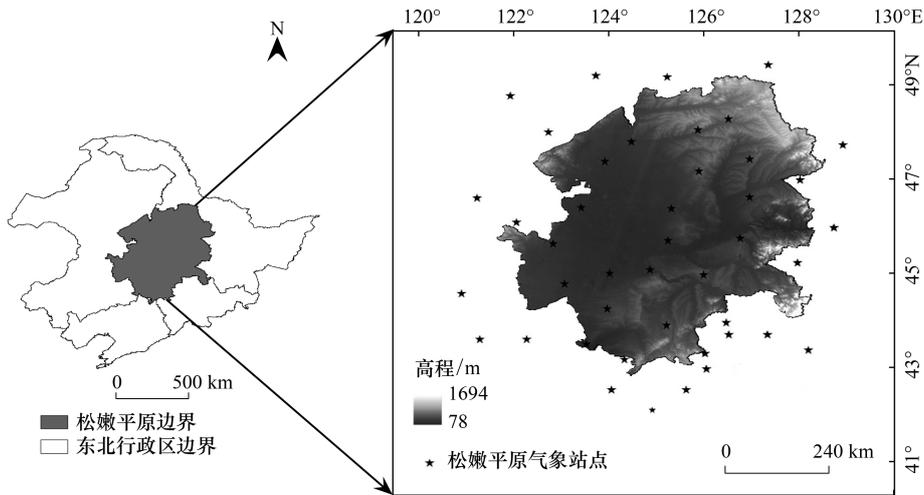


图 1 研究区地形与行政区划

Fig. 1 The topography and administrative divisions of the study area

## 1.2 数据来源及预处理

### 1.2.1 遥感影像分类

本研究所使用的遥感影像来源于美国陆地资源卫星 Landsat 数据,不同时间点的影像首选 1985 年、1995 年、2005 年以及 2015 年内的遥感影像,如果时间节点内影像的质量未达到研究的要求,则选用时间节点前后 2 年时间内的影像,因 2、3 年时间对于土地利用变化影响不大,解译的土地利用数据满足研究的要求和精度,影像月份一般选用 5 月、6 月以及 8 月数据,具体数据参数见下表。

表 1 Landsat 卫星遥感数据参数表

Table 1 Landsat satellite remote sensing data parameter

年份 Year	传感器类型 Sensor type	成像月份 Imaging month	行列号 Row and column number	分辨率/m Resolution	云量 Cloud coverage
1985 年	Landsat TM	5 月末、6 月初以及 8 月份	117—27、117—28、 117—29、118—27、 118—28、118—29、	30	云量均小于 10%
1995 年			118—30、119—26、 119—27、119—28、		
2005 年			119—29、119—30、 120—26、120—27、		
2015 年			120—28、120—29、 121—27、121—28		

利用 ArcGIS 软件随机选取松嫩平原 500 个样本点,提取 1985 年、1995 年、2005 年以及 2015 年土地利用/覆盖分类结果信息,结合 Google Earth 软件将分类结果与 Google Earth 提供的信息进行对比,建立混淆矩阵进行精度评价(表 2)。结果表明,采用监督分类与目视解译相结合的方法适用于土地利用/覆盖信息的提取,其

提取信息的平均精度为 91.32%, 总体 Kappa 系数为 0.873, 满足研究的需求。

表 2 研究区土地利用/覆盖分类精度评价

Table 2 Evaluation of LUCC classification accuracy in the study area

年份 Year	1985 年	1995 年	2005 年	2015 年
总精度 Total accuracy/%	93.71	90.26	91.82	89.43
Kappa 系数 Kappa coefficient	0.881	0.813	0.827	0.806

为了有效分析松嫩平原不同空间尺度土地利用强度变化的空间特征, 该文利用 ArcGIS 软件中的 Create fishnet 功能创建 1 km, 3 km, 5 km, 10 km 以及 20 km 的正方形渔网, 并基于不同空间尺度的渔网对研究区内 1985 年、1995 年、2005 年以及 2015 年土地利用/覆盖数据进行分割并生成样本点集。

### 1.2.2 气象数据

本文选用的气象数据主要包括松嫩平原 1980—2018 年 39 年间的逐年降水数据与温度数据, 数据的分别为 1 km, 数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供, 以及由 NCEP 与美国能源部 (DOE) 提供的 NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis 再分析资料。中国科学院资源环境科学数据中心提供的数据是基于全国 2400 多个气象站点日观测数据, 采用澳大利亚的 ANUSPLIN 插值软件进行数据的插值计算。ANUSPLIN 是一种采用平滑样条函数对多变量数据进行分析 and 插值的工具<sup>[31]</sup>, 即使用函数逼近曲面的一种方法, 它能够对数据进行合理的统计分析和数据诊断, 并可以对数据的空间分布进行分析进而实现空间插值的功能, 最终得到的数据满足研究对数据精度的要求。

为保证研究的精确性, 体现下垫面地表覆盖变化对气候因子的影响, 该文选取 NCEP 与美国能源部 (DOE) 的 NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis 资料, 利用 Kalnay 等<sup>[32]</sup>提出的“观测资料减去再分析”(Observation Minus Reanalysis, OMR) 方法对气候因子数据进行处理。因为 NCEP 再分析资料在同化时未选用地表观测数据, 因而再分析气象数据对于下垫面的物理特征表现不敏感, 利用地面观测数据减去 NCEP 再分析气象数据得到的差值, 其可以有效的反映下垫面覆盖变化对于气候因子的影响。最后, 该文利用不同空间尺度的正方形网格将处理后的气象数据进行切割并生成样本点, 将不同样本区内气候因子的均值作为样本点的值。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用强度模型的建立

土地利用强度指的是某一时间点特定区域人类活动对土地利用强度的干扰情况, 代表人类开发利用土地的强度。该文参考前人的研究成果与经验<sup>[1,18,23]</sup>, 依据不同土地利用类型对气候因子的影响程度进行不同土地利用类型利用强度等级的划分。最终, 将不同土地利用类型的等级强度划分为: I 级为水域, II 级为湿地, III 级为林地, IV 级为水田, V 级为旱田, VI 级为未利用地, VII 级为建设用地, 其土地利用强度分级指数由大到小分别为 1—7。其土地利用强度公式如下:

$$L = \sum_{j=1}^m A_j \times \frac{S_j}{S} \quad (2)$$

式中,  $L$  表示样本区域土地利用强度值;  $A_j$  表示样本区域第  $j$  种土地利用类型的强度分级指数;  $S_j$  表示第  $j$  种土地利用类型的面积;  $S$  表示样本区域土地利用总面积;  $m$  表示土地利用强度分级数。

### 2.2 趋势分析

采用基于像元的一元线性回归分析法研究松嫩平原 1980—2018 年逐年降水与温度数据的变化趋势, 其公式为:

$$T_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times T_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n T_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (4)$$

式中,  $n$  为年数(时间序列为 1980—2018 年, 即  $n = 39$ );  $T_i$  为研究区内各像元点在第  $i$  年的年降水与温度值;  $T_{\text{slope}}$  为 1980—2018 年研究区内各像元点降水与温度年际变化的一元线性回归方程的斜率, 即趋势变化率, 反映研究时段内降水与温度数据的总体变化趋势。  $T_{\text{slope}} > 0$  表明气象因子数据总体变化呈增加趋势, 反之为减少趋势。

### 2.3 相关性分析

该文利用相关性分析来研究土地利用强度变化对气候因子的影响, 相关性分析是研究两个或两个以上的时序变量变化趋势之间的关系, 在排除全球气候变化、地形因子以及土壤条件的影响下, 利用该方法分析土地利用强度与气候因子之间的相关关系, 可以有效的反映土地利用强度变化对于气候因子的影响, 若土地利用强度变化与气候因子变化表现为正相关, 则两个时序变量同方向变化, 表示土地利用强度变化对于气候因子的增加起促进作用, 反之起抑制作用。

#### 1) 简单相关性分析

简单相关性分析是研究两个或两个以上处于同等地位随机变量间相关关系的统计分析方法<sup>[33]</sup>, 其可以有效表示两个变量为同方向或反方向变化。该文利用基于像元的相关性分析降雨和温度与土地利用强度之间的空间相关性, 简单相关系数计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中,  $R_{xy}$  表示  $x, y$  两个影响因子之间的简单线性相关系数;  $x_i, y_i$  分别表示两个影响因子第  $i$  年的值;  $\bar{x}, \bar{y}$  表示两个影响因子的年平均值;  $n$  表示累积年数。

#### 2) 偏相关性分析

偏相关分析是在简单线性相关的基础上研究两个影响因子之间的关系的, 该分析可以有效的排除其他因子的影响研究两个因子之间的相关性<sup>[34]</sup>, 其计算公式如下:

$$R_{xy.z} = \frac{R_{xy} - R_{xy}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)} \sqrt{(1 - R_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中,  $R_{xy.z}$  表示自变量  $z$  (降水或温度) 固定后因变量  $x$  (土地利用强度指数) 与自变量  $y$  (温度或降水) 之间的偏相关系数。

#### 3) 复相关分析

复相关分析指的是综合考虑多个相关影响因子的共同作用, 分析多个自变量与因变量之间的关系, 它可以有效的反映各个要素的综合影响。复相关系数越大, 表明要素或变量之间的线性相关程度越密切<sup>[35]</sup>。复相关的计算公式如下:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^2)(1 - R_{xz,y}^2)} \quad (8)$$

式中,  $R_{x,yz}$  表示因变量  $x$  与自变量  $y, z$  之间的复相关系数;  $R_{xy}$  表示  $x$  与  $y$  之间的线性相关系数;  $R_{xz,y}$  表示固定自变量  $y$  之后因变量  $x$  与自变量  $z$  的偏相关系数; 其中  $x, y$  表示降水或者温度值,  $z$  表示土地利用强度指数。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同空间尺度土地利用强度时空分布特征分析

该文利用 ArcGIS 软件建立不同空间尺度的渔网, 以此提取松嫩平原不同空间尺度条件下的土地利用类型信息数据, 运用 Matlab 软件计算不同空间尺度条件下土地利用强度变化情况, 具体如下图。

由图可以看出, 松嫩平原土地利用强度高值区域主要分布于齐齐哈尔市东部及南部、哈尔滨市西部、绥化市中西部、松原市以及长春市等地区; 土地利用强度低值区域主要分布于松嫩平原东部以及南部部分地区,

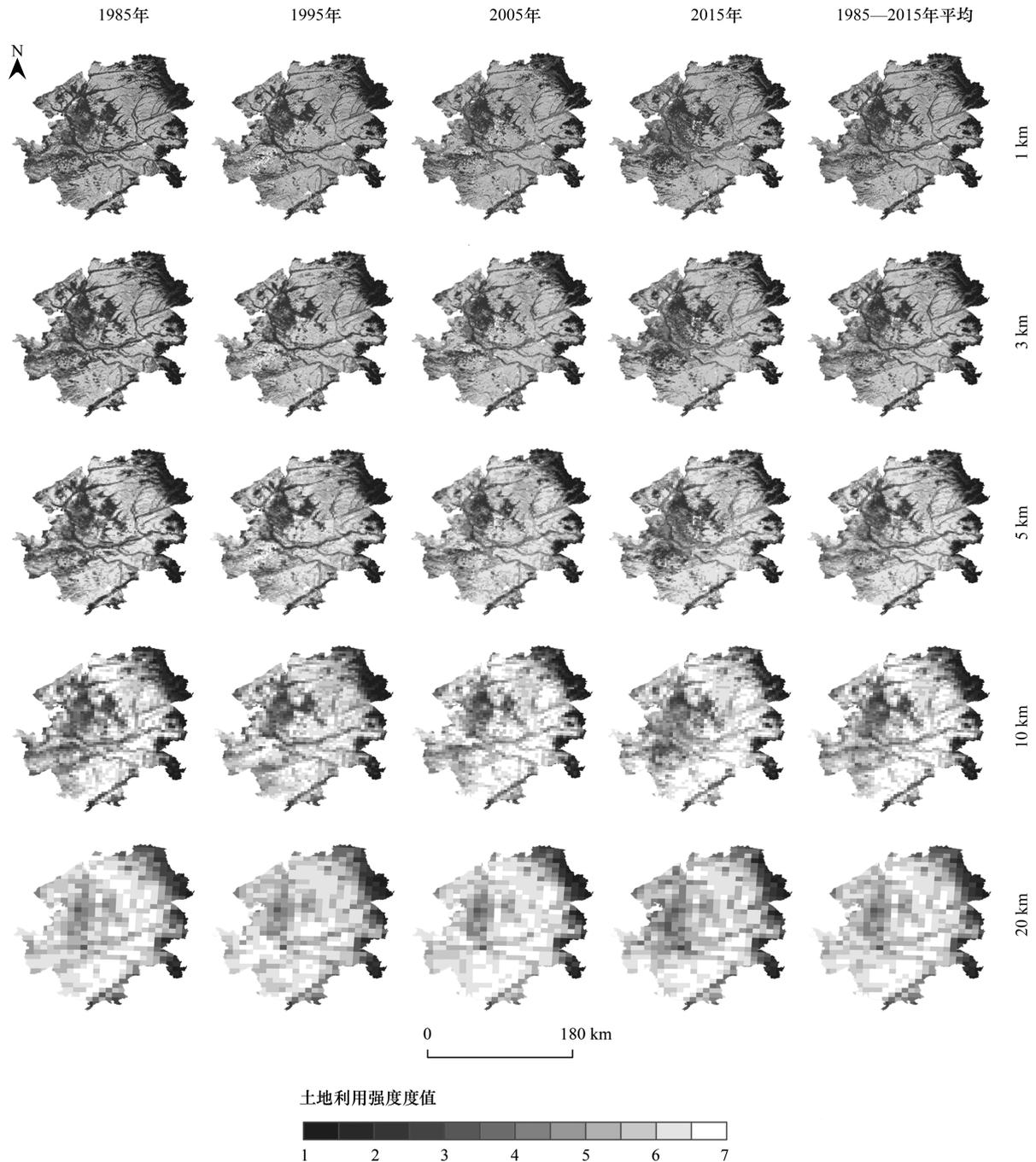


图2 不同空间尺度土地利用强度时空分布图

Fig.2 Spatial and temporal distribution of land use intensity at different spatial scales

主要为黑河市东部、哈尔滨市东部以及长春市东部等地区。从时间尺度上来看,随着时间的推移土地利用强度低值区域在不断的减少,这主要是由于农业大规模的开发引起的;从空间尺度上升来看,空间尺度的不断增加松嫩平原土地利用强度的均质性逐渐地增强,即每个像元的土地利用强度值逐渐向均值靠近。

为了进一步分析研究区域内土地利用强度的变化情况,该文提取不同时间和空间尺度条件下土地利用强度均值及土地利用强度值的主要分布区间。如表所示,在时间尺度上,研究区域土地利用强度均值表现为先增加后降低的变化趋势,这主要是农业开发强度经历先增强后逐渐减弱的原因;从土地利用强度主要分布区间变化情况来看,随着时间的不断推移,占研究区域主要部分的区域在不断的变化,大致呈现逐渐增加的趋

势,表明研究区域土地利用强度的不断增加。在空间尺度上,不同空间尺度的土地利用强度的均值分别为 3.92、3.92、3.93、3.93 以及 4.34,土地利用强度均值呈现先不变后逐渐增加的变化趋势;而对于土地利用强度的主要分布区间表现为不同时间段内主要分布区间均表现为向均值不断聚集的变化趋势且分布区间的中值也在不断的增加。

表 3 不同时间段不同空间尺度下土地利用强度变化情况

Table 3 Changes of land use intensity at different spatial scales in different time periods

空间分辨率 Spatial resolution	1 km	3 km	5 km	10 km	20 km
1985 年均值 Mean in 1985 (主要部分分布 Main part distribution)	3.71 (2.22—5.12)	3.71 (2.48—5)	3.71 (2.62—4.96)	3.715 (2.80—4.89)	4.30 (3.98—5.01)
1995 年均值 Mean in 1985 (主要部分分布 Main part distribution)	3.97 (2.81—5.19)	3.97 (2.93—5.07)	3.97 (3.04—5.05)	3.98 (3.13—4.98)	4.38 (4.05—5.05)
2005 年均值 Mean in 1985 (主要部分分布 Main part distribution)	4.03 (2.97—5.19)	4.03 (3.14—5.05)	4.03 (3.24—5.01)	4.04 (3.34—4.98)	4.42 (4.19—5.07)
2015 年均值 Mean in 1985 (主要部分分布 Main part distribution)	4.01 (2.89—5.12)	4.01 (3.07—5.02)	4.01 (3.17—5)	4.02 (3.28—4.94)	4.35 (3.98—4.99)
1985—2015 年均值 Mean value from 1985 to 2015 (主要部分分布 Main part distribution)	3.92 (2.91—5.07)	3.92 (3.05—5)	3.92 (3.11—4.96)	3.93 (3.19—4.90)	4.34 (4.06—5.00)

### 3.2 气候因子变化

降水和温度是气候系统中重要的组成部分,其可以有效的反映区域水热分布情况<sup>[20]</sup>;与此同时,降水与温度也是受土地利用/覆盖变化表现最为直接的因素,因此本文选取平均降水量与平均温度分析区域气候系统的变化情况。

1980—2018 年松嫩平原多年平均降水量和多年平均温度表现明显的空间分异特征(图 3)。就平均降水量来看,松嫩平原整体约呈现由西南向东北逐渐增加的趋势,其中白城市、松原市西部以及大庆市中西部为降水量低值区域,多年平均降水量为 423.57 mm/a;降水量高值区域主要分布于长春市西南部、哈尔滨市西部以及绥化市西部,多年平均降水量为 653.28 mm/a。就平均温度来看,研究区域呈现明显由西南向东北逐渐增加的趋势,其中白城市、松原市、四平市以及长春市中西部为平均温度的高值区域,多年平均温度为 6.10 °C/a;平均温度低值区域主要分布于黑河市、绥化市西部以及齐齐哈尔市西北部,多年平均温度为 0.495 °C/a。

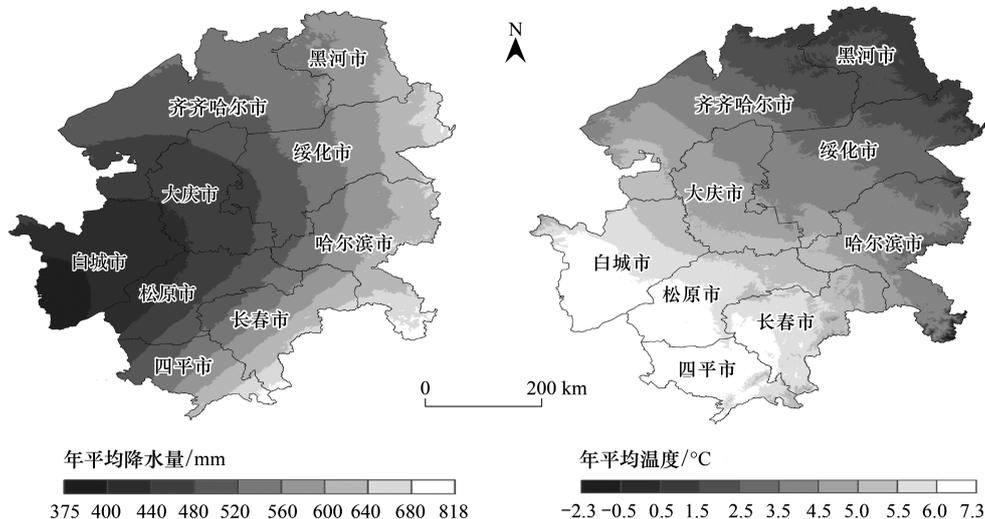


图 3 1980—2018 年年平均降水量与年平均温度分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of annual average precipitation and annual average temperature from 1980 to 2018

1980—2018年,松嫩平原降水量和温度年际变化呈现明显的空间分异规律。就降水量年际变化来看,松嫩平原降水量的趋势变化率在 $-38.76\sim 15.52\text{ mm}/10\text{ a}$ ,平均变化率为 $-9.89\text{ mm}/10\text{ a}$ ,在空间上,研究区域整体表现为由西南向东北逐渐增加的趋势,其中白城市中西部、松原市南部、长春市北部以及哈尔滨南部等呈现降水量下降的趋势,平均减少降水量为 $-22.43\text{ mm}/10\text{ a}$ ;黑河市、绥化市北部降水量呈现明显的增加趋势,平均增加降水量为 $6.57\text{ mm}/10\text{ a}$ 。就温度年际变化来看,松嫩平原温度的趋势变化率在 $0.006\sim 0.413\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$ ,平均变化率为 $0.26\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 。在空间上,研究区域大致表现为两端低、中间高的变化趋势,其中大庆市西部、绥化市中西部、哈尔滨市东部以及齐齐哈尔市北部平均温度呈现增加的趋势,平均增加值为 $0.341\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$ ;低值区域主要分布于大庆市与齐齐哈尔市交接处、哈尔滨市西部、四平市南部以及黑河市,其平均值为 $0.139\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 。

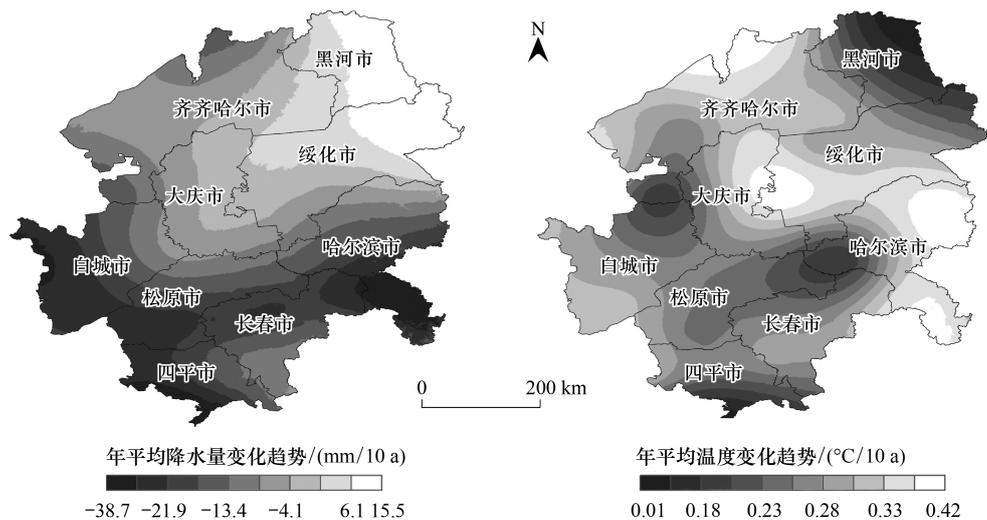


图4 1980—2018年年平均降水与年平均温度变化趋势分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of annual average precipitation and annual average temperature from 1980 to 2018

### 3.3 不同空间尺度土地利用强度变化对气候因子的影响

因引起局部气候因子变化的原因主要有全球气候变化的影响、土地利用覆盖变化的影响以及地形因子变化的影响<sup>[36]</sup>,该文利用“观测资料减去再分析”(Observation Minus Reanalysis, OMR)方法对气象数据进行处理,该方法可以有效排除全球气候变化规律等因素带来的影响。此外,松嫩平原近30年间地形等条件变化不明显,故利用处理后的气候因子数据进行相关性研究,可以有效分析土地利用/覆盖变化对于气候因子的影响,如果两者表现为正相关,说明土地利用强度变化对于气候因子变化有促进作用,反之有抑制作用。

#### 3.3.1 土地利用强度与气候因子的简单相关性分析

从不同空间尺度松嫩平原土地利用强度与降水相关关系的空间分布来看,松嫩平原土地利用强度与降水之间呈现较为明显的负相关的关系,且随着空间尺度不断增加负相关性表现出先增加后降低的变化趋势。1 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 $-0.33$ ,其相关关系值为负值的区域面积为 $14.1\text{ 万 km}^2$ ,占总研究区域面积的 $62.84\%$ ;3 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 $-0.43$ ,其相关关系值为负值的区域面积为 $15.44\text{ 万 km}^2$ ,占总面积的 $68.62\%$ ;5 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 $-0.56$ ,其相关关系值为负值的区域面积为 $16.07\text{ 万 km}^2$ ,占总面积的 $71.42\%$ ;10 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 $-0.63$ ,其相关关系值为负值的区域面积为 $17.12\text{ 万 km}^2$ ,占总面积的 $76.11\%$ ;20 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 $-0.49$ ,其相关关系值为负值的区域面积为 $16.05\text{ 万 km}^2$ ,占总面积的 $71.32\%$ 。

从不同空间尺度松嫩平原土地利用强度与温度相关关系的空间分布来看,松嫩平原土地利用强度与温度

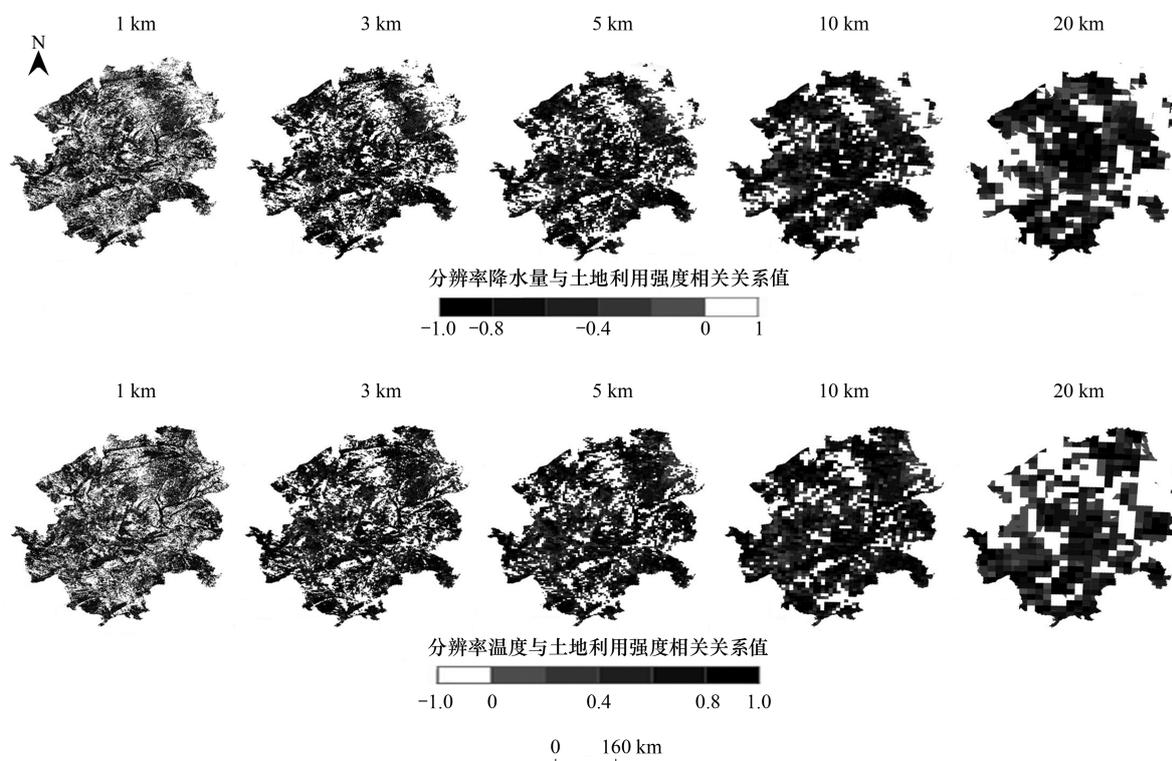


图5 不同空间尺度条件下土地利用强度与气候因子之间的相关系数

Fig. 5 The correlation coefficient between land use pattern and climatic factors at different spatial scales

之间呈现明显的正相关的相关关系,其相关关系随着空间尺度的不断增加表现为先增加后降低的变化趋势。1 km 空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 0.56,其相关关系值为负值的区域面积为 14.61 万  $\text{km}^2$ , 占总研究区域面积的 64.93%; 3 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 0.61,其相关关系值为负值的区域面积为 16.56 万  $\text{km}^2$ , 占总面积的 73.58%; 5 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 0.68,其相关关系值为负值的区域面积为 17.35 万  $\text{km}^2$ , 占总面积的 77.12%; 10 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 0.71,其相关关系值为负值的区域面积为 18.53 万  $\text{km}^2$ , 占总面积的 82.33%; 20 km 网格空间尺度条件下,土地利用强度与降水之间的相关关系均值为 0.61,其相关关系值为负值的区域面积为 15.93 万  $\text{km}^2$ , 占总面积的 70.82%。

### 3.3.2 土地利用强度与气候因子的偏相关性分析

从不同空间尺度条件下土地利用强度与降水之间的偏相关可以看出,随着空间尺度的不断增加,土地利用强度与降水之间的偏相关系数的均值分别为 -0.13、-0.24、-0.33、-0.37 以及 -0.34, 呈现逐渐降低的变化趋势。T 检验结果表明,通过显著性水平为 0.05 T 检验的面积分别为 2.48 万  $\text{km}^2$ 、2.7 万  $\text{km}^2$ 、3.04 万  $\text{km}^2$ 、3.08 万  $\text{km}^2$  以及 2.72 万  $\text{km}^2$ , 分别占研究区域面积的比例为 11%、12%、13.5%、13.7% 以及 12.1%; 通过显著水平为 0.01 T 检验的面积分别为 1.05 万  $\text{km}^2$ 、1.25 万  $\text{km}^2$ 、1.42 万  $\text{km}^2$ 、1.59 万  $\text{km}^2$  以及 1.2 万  $\text{km}^2$ , 分别占研究区域面积的比例为 7%、7.9%、9.8%、10.1% 以及 7.6%。由此可知,随着空间尺度的不断变化土地利用强度对于降水的影响表现为抑制作用,其抑制作用呈现先增强后减弱的变化趋势,其土地利用强度与降水之间的最佳相互作用空间尺度为 10 km 网格。

从不同空间尺度条件下土地利用强度与温度之间的偏相关可以看出,土地利用强度与温度之间的偏相关比与降水的偏相关表现更强,说明土地利用强度对于温度的影响明显强于对降水的影响。土地利用强度与温度之间的偏相关系数均值分别为 0.32、0.36、0.42、0.45 以及 0.23, 表明土地利用强度对于温度的影响随着空

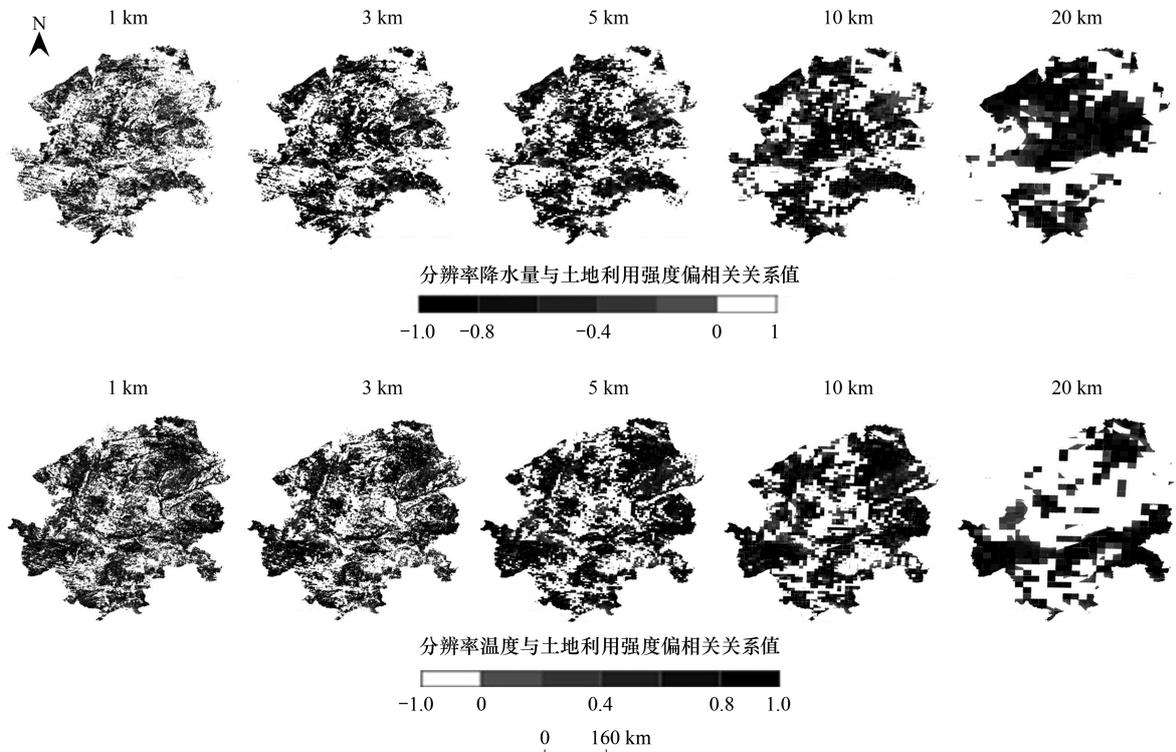


图 6 不同空间尺度条件下土地利用强度与气候因子之间的偏相关系数

Fig. 6 The partial correlation coefficients between land use patterns and climatic factors at different spatial scales

间的不断变化呈现先增强后减弱的变化趋势。T 检验结果表明,通过显著性水平为 0.05 T 检验的面积分别为 2.79 万 km<sup>2</sup>、3.04 万 km<sup>2</sup>、4.66 万 km<sup>2</sup>、4.79 万 km<sup>2</sup>以及 2.77 万 km<sup>2</sup>,分别占研究区域面积的比例为 12.4%、13.5%、20.7%、21.3%以及 12.3%;通过显著水平为 0.01 T 检验的面积分别为 1.28 万 km<sup>2</sup>、1.5 万 km<sup>2</sup>、1.59 万 km<sup>2</sup>、1.8 万 km<sup>2</sup>以及 1.02 万 km<sup>2</sup>,分别占研究区域面积的比例为 8.1%、9.5%、10.4%、11.4%以及 6.5%。由此可知,随着空间尺度的不断变化土地利用强度对于温度的影响表现为促进作用,其促进作用先增强后减弱的变化趋势,其土地利用强度与降水之间的最佳相互作用空间尺度为 10 km 网格。

表 4 松嫩平原不同空间尺度土地利用强度与气候因子之间 T 检验

Table 4 T-test between land use intensity and climatic factors at different spatial scales in Songnen Plain

空间尺度 Spatial scale	1km 网格 1km grid		3km 网格 3km grid		5km 网格 5km grid		10km 网格 10km grid		20km 网格 20km grid	
类型 Types	降水	温度								
偏相关均值 Partial correlation mean	-0.03	0.32	-0.11	0.36	-0.17	0.42	-0.21	0.45	-0.34	0.23
T 检验 T test	面积 Area/10 <sup>4</sup> km									
(α=0.05)	2.48	2.79	2.7	3.04	3.04	4.66	3.08	4.79	2.72	2.77
	11	12.4	12	13.5	13	20.7	13.5	21.3	12.5	12.3
T 检验 T test	面积 Area/10 <sup>4</sup> km									
(α=0.01)	1.05	1.28	1.25	1.5	1.42	1.59	1.59	1.8	1.2	1.02
	7	8.1	7.9	9.5	9.8	10.4	10.1	11.4	7.6	6.5

### 3.3.3 土地利用强度与气候因子的复相关性分析

分析松嫩平原土地利用强度与降水、温度之间的相关性,松嫩平原土地利用强度与降水、温度呈现明显的相关性。统计表明,整个研究区不同空间尺度条件下土地利用强度与降水、温度之间的平均复相关系数分别为 0.67、0.72、0.83、0.85 以及 0.69,其中复相关指数的低值区域主要分布在绥化市东部以及白城市南部等少

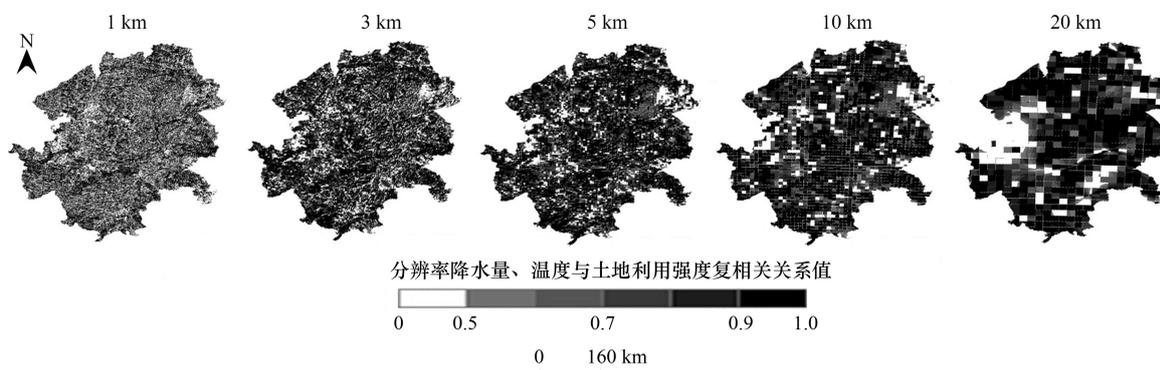


图7 不同空间尺度条件下土地利用强度与气候因子之间的复相关系数

Fig.7 The multiple correlation coefficients between land use patterns and climate factors at different spatial scales

部分地区,其余地区均表现明显的相关性。通过进行 F 检验分析,不同空间尺度通过 0.05 显著检验的区域总面积分别为 7.81 万  $\text{km}^2$ 、8.96 万  $\text{km}^2$ 、11.14 万  $\text{km}^2$ 、11.78 万  $\text{km}^2$  以及 9.14 万  $\text{km}^2$ ,分别占总面积的 34.7%、39.8%、49.5%、52.35% 以及 40.6%;通过 0.01 显著性检验区域的总面积分别为 3.87 万  $\text{km}^2$ 、4.41 万  $\text{km}^2$ 、4.52 万  $\text{km}^2$ 、6.05 万  $\text{km}^2$  以及 5.27 万  $\text{km}^2$ ,分别占总面积的 17.2%、19.6%、20.1%、26.9% 以及 23.4%。通过分析土地利用强度与温度、降水之间的复相关性可知,松嫩平原土地利用强度与区域降水、温度之间具有明显的相关性,表明区域土地利用强度对区域降水、温度产生明显的影响。在空间尺度上,10 km 正方形网格表现更为明显的相关性,从 10 km 网格空间尺度分析土地利用强度与区域气候之间的关系具有更好的效果。

#### 4 讨论

本研究发现,随着空间尺度的不断的增加,土地利用强度均质化程度不断的增强,即表现为研究区域不同空间上土地利用强度值不断向均值聚集,这与已有的空间尺度研究结果类似<sup>[37-38]</sup>。另外,该文分别选取 1 km、3 km、5 km、10 km 以及 20 km 正方形区域作为研究的空間尺度,可以明显的反映土地利用强度不同空间尺度的变化过程,包括土地利用强度演变过程中的缓慢上升期和骤变期,此空间尺度的选择可以有效地表现土地利用强度空间变化过程中与气候因子之间的关系。

本研究发现,不同空间尺度的土地利用强度与降水和温度均表现一定的相关性,其与降水呈现较为明显的正相关,即对降水量的增加表现为抑制作用,与温度呈现较为明显的负相关,即对温度的增加表现为促进作用,且通过分析不同空间尺度条件下土地利用强度与气候因子之间的关系可以看出,在 10 km 网格空间尺度条件下土地利用强度与气候因子表现出更为强烈的相关性。由此可以看出以 10 km 网格为评价单元,研究评价单元内土地利用/覆盖变化与气候因子之间的关系具有更好的效果。

在以往的研究中,学者通常选择单一空间尺度研究土地利用/覆盖变化与气候因子的变化情况之间的关系<sup>[39-41]</sup>,而并未充分考虑土地利用/覆盖变化的尺度效应,寻求土地利用/覆盖影响区域气候的最佳空间尺度可以更为精确的研究土地利用/覆盖变化与气候因子之间的关系。在未来的土地利用过程中,我们应当以最佳空间尺度为单位进行土地利用的空间规划,以区域空间布局为重要依托,建立适应于气候变化的区域土地利用强度,这样既可以满足我们对于土地的使用,也可以调节小区域气候的变化,抑制全球气候变化对于我们的影响。

#### 5 结论

主要结论有:

(1)在时间尺度上,松嫩平原不同空间尺度的土地利用强度均值整体表现为增加的变化趋势,但变化趋势在不断的减弱;在空间尺度上,不同空间尺度的土地利用强度的均值分别为 3.92、3.92、3.93、3.93 以及

4.34,土地利用强度均值呈现先不变后逐渐增加的变化趋势。

(2)1980—2018年松嫩平原多年平均降水量和多年平均温度表现明显的空间分异特征,整体约呈现由西南向东北逐渐增加的趋势。就降水量年际变化来看,松嫩平原降水量的趋势变化率在 $-38.76$ — $15.52$  mm/10a,平均变化率为 $-10.01$  mm/10a;年平均温度的趋势变化率在 $0.006$ — $0.413$  mm/10a,平均变化率为 $0.26$  mm/10a。

(3)从不同空间尺度松嫩平原土地利用强度与降水、温度相关关系的空间分布来看,松嫩平原土地利用强度与降水之间呈现较为明显的负相关的关系,与温度之间呈现较为明显的正相关的关系,且随着空间尺度不断增加相关性均表现出先增加后降低的变化趋势。

(4)从松嫩平原土地利用强度与降水和温度的偏相关来看,不同空间尺度上土地利用强度与降水之间的偏相关系数的均值分别为 $-0.13$ 、 $-0.24$ 、 $-0.33$ 、 $-0.37$ 以及 $-0.34$ ;与温度之间的偏相关系数均值分别为 $0.32$ 、 $0.36$ 、 $0.42$ 、 $0.45$ 以及 $0.23$ ;由此可以看出,土地利用强度与温度之间的偏相关比与降水的偏相关表现更强,说明土地利用强度对于温度的影响明显强于对降水的影响,且在 $10$  km 网格空间尺度上相互作用表现的更为明显。

(5)整个研究区不同空间尺度条件下土地利用强度与降水、温度之间的平均复相关系数分别为 $0.67$ 、 $0.72$ 、 $0.83$ 、 $0.85$ 以及 $0.69$ 。在空间尺度上, $10$  km 正方形区域表现更为明显的相关性,从 $10$  km 网格空间尺度分析土地利用强度与区域气候之间的关系具有更好的效果。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 宋戈,王越. 松嫩高原土地利用格局变化时空分异. 农业工程学报, 2016, 32(18): 225-233.
- [ 2 ] 李维维,陈田,马晓龙. 城市旅游综合体土地利用空间格局演变及驱动机制——以西安曲江为例. 地理研究, 2019, 38(5): 1103-1118.
- [ 3 ] 王越,宋戈,吕冰. 基于多智能体粒子群算法的松嫩平原土地利用格局优化. 资源科学, 2019, 41(4): 729-739.
- [ 4 ] Chen L G, Yang X Y, Chen L Q, Li L. Impact assessment of land use planning driving forces on environment. Environmental Impact Assessment Review, 2015, 55: 126-135.
- [ 5 ] Tsai Y, Zia A, Koliba C, Bucini G, Guilbert J, Beckage B. An interactive land use transition agent-based model (ILUTABM): Endogenizing human-environment interactions in the Western Missisquoi Watershed. Land Use Policy, 2015, 49: 161-176.
- [ 6 ] Wang Y Q, Shao M A, Zhang C C, Han X W, Mao T X, Jia X X. Choosing an optimal land-use pattern for restoring eco-environments in a semiarid region of the Chinese Loess Plateau. Ecological Engineering, 2015, 74: 213-222.
- [ 7 ] Stone Jr B. Land use as climate change mitigation. Environmental Science & Technology, 2009, 43(24): 9052-9056.
- [ 8 ] 杜国明,刘文琦,于佳兴,张爽. 三江平原水旱田分布对遥感反演局地地表温度的影响. 农业工程学报, 2019, 35(5): 259-267.
- [ 9 ] Wang W, Wu X H, Yin C M, Xie X L. Nutrition loss through surface runoff from slope lands and its implications for agricultural management. Agricultural Water Management, 2019, 212: 226-231.
- [ 10 ] 叶鑫,邹长新,刘国华,林乃峰,徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [ 11 ] Huang Y L, Huang J L. Coupled effects of land use pattern and hydrological regime on composition and diversity of riverine eukaryotic community in a coastal watershed of Southeast China. Science of the Total Environment, 2019, 660: 787-798.
- [ 12 ] Cheng P X, Meng F S, Wang Y Y, Zhang L S, Yang Q, Jiang M C. The impacts of land use patterns on water quality in a trans-boundary river basin in northeast China Based on eco-functional regionalization. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(9): 1872.
- [ 13 ] Zhang X Z, Wang W C, Fang X Q, Ye Y, Zheng J Y. Agriculture development-induced surface albedo changes and climatic implications across northeastern China. Chinese Geographical Science, 2012, 22(3): 264-277.
- [ 14 ] Ge Q S, Zhang X Z, Zheng J Y. Simulated effects of vegetation increase/decrease on temperature changes from 1982 to 2000 across the Eastern China. International Journal of Climatology, 2014, 34(1): 187-196.
- [ 15 ] Zhang X Z, Tang Q H. Response of simulated surface air temperature to the interannual variability of leaf area index in eastern China. Advances in Meteorology, 2013, 2013: 817870.
- [ 16 ] Zhou L, Dickinson R E, Tian Y, Jin M, Ogawa K, Yu H, Schmugge T. A sensitivity study of climate and energy balance simulations with use of satellite-derived emissivity data over northern Africa and the Arabian Peninsula. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D24): 4795.

- [17] Loose T, Bornstein R D. Observations of mesoscale effects on frontal movement through an urban area. *Monthly Weather Review*, 1977, 105(5): 563-571.
- [18] 翟俊, 邵全琴, 刘纪远. 内蒙古高原土地利用/覆被变化对气温变化的影响分析. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 967-978.
- [19] 叶红, 张廷斌, 易桂花, 李景吉, 别小娟, 刘栋, 罗琳玲. 2000—2014 年黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子关系. *地理学报*, 2018, 73(11): 2117-2134.
- [20] 江颖慧, 焦利民, 张博恩. 城市地表温度与 NDVI 空间相关性的尺度效应. *地理科学进展*, 2018, 37(10): 1362-1370.
- [21] 崔林丽, 杜华强, 史军, 陈昭, 郭巍. 中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究. *地理科学*, 2016, 36(5): 787-793.
- [22] Yue T X, Fan Z M, Chen C F, Sun X F, Li B L. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2342-2361.
- [23] 曹巍, 邵全琴, 刘纪远, 胡卓玮. 北京地区土地利用/覆被及其变化对气温升温的影响分析. *气候与环境研究*, 2013, 18(4): 451-460.
- [24] 曹峥, 廉丽妹, 李宝富. 黄河三角洲湿地面积变化对 8 月份气候影响的数值模拟试验. *咸阳师范学院学报*, 2014, 29(6): 69-76.
- [25] 武利阳, 左洪超, 冯锦明, 陈伯龙, 董龙翔. 中国土地利用和植被覆盖度变化对区域气候影响的数值模拟. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(3): 334-344.
- [26] 张宏文, 张学珍, 张丽娟. WRF 模拟的 1980—2000 年中国东北农业开发对气候的影响. *地理研究*, 2015, 34(10): 1853-1863.
- [27] 华文剑, 陈海山, 李兴. 未来土地利用变化影响中国区域气候的数值模拟. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(7): 1034-1042.
- [28] 林佳, 宋戈, 张莹. 耕地植被人为干扰格局动态变化特征及其尺度效应. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 275-284.
- [29] 田旻, 那晓东, 臧淑英. 1986—2010 年松嫩平原土地利用程度空间格局变化研究. *哈尔滨师范大学: 自然科学学报*, 2016, 32(3): 101-107.
- [30] 马丹阳, 尹云鹤, 吴绍洪, 郑度. 中国干湿格局对未来高排放情景下气候变化响应的敏感性. *地理学报*, 2019, 74(5): 857-874.
- [31] Guo B B, Zhang J, Meng X Y, Xu T B, Song Y Y. Long-term spatio-temporal precipitation variations in China with precipitation surface interpolated by ANUSPLIN. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 81.
- [32] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds B, Jenne R, Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 74(3): 437-472.
- [33] Pfortner T K, Pfaff H, Hower K I. Trends in the association of different forms of precarious employment and self-rated health in Germany. An analysis with the German Socio-Economic Panel between 1995 and 2015. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 2019, 73(11): 1002-1011.
- [34] 袁博. 基于混合像元空间与谱间相关性模型的 NMF 线性盲解混. *测绘学报*, 2019, 48(9): 1151-1160.
- [35] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [36] 蔡榕硕, 付迪. 全球变暖背景下中国东部气候变迁及其对物候的影响. *大气科学*, 2018, 42(4): 729-740.
- [37] 徐冬, 黄震方, 胡小海, 吕龙, 曹芳东. 浙江省县域旅游效率空间格局演变及其影响因素. *经济地理*, 2018, 38(5): 197-207.
- [38] 彭建, 徐飞雄. 不同网格尺度下的黄山市生境质量差异分析. *地球信息科学学报*, 2019, 21(6): 887-897.
- [39] 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 吕兴菊, 薛力强, 储昭升. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响. *生态学报*, 2018, 38(3): 876-885.
- [40] 王静, 万红莲, 姚顺波. 生长季川陕不同地带植被覆盖对气候变化的时空响应. *生态学报*, 2019, 39(14): 5218-5231.
- [41] 盛任, 万鲁河. 乌伊岭国家级自然保护区植被覆盖演变及其对气候突变的响应. *生态学报*, 2019, 39(9): 3243-3256.