

王拾彝,潘 涛,雷国平. 基于 Landsat TM 的哈尔滨市土地利用格局及 NDVI 响应特征[J]. 江苏农业科学,2019,47(6):221-225.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.06.048

# 基于 Landsat TM 的哈尔滨市土地利用格局及 NDVI 响应特征

王拾彝<sup>1</sup>, 潘 涛<sup>2,3</sup>, 雷国平<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江哈尔滨 150030;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所/荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为量化 30 m 尺度植被覆盖指数(NDVI)对土地利用的响应特征,选择快速城市化地区,基于国家资源环境遥感信息平台土地利用数据,采用 Google Engine 云平台计算 2000—2015 年 NDVI 逐年最大数值,开展土地利用变化的数量与格局分析,探究 NDVI 的变化趋势,厘清 NDVI 对土地利用的响应状况。结果表明:(1)2000—2015 年黑龙江省哈尔滨市耕地、林地、草地、未利用地分别减少 56.83、80.74、7.82、141.60 km<sup>2</sup>,城乡和水域用地增加 259.08、27.93 km<sup>2</sup>。(2)NDVI 现状区间主要为[0.5,0.8],占全域面积的 73.02%,以乡村农田分布区为主,NDVI 趋势的变化区间为[-0.50,0.40],负值占 34.62%,正值占 65.38%,表明大部地区植被趋于增加。(3)随着土地利用格局的变化,NDVI 对耕地、草地、城市用地的响应为正,分别增加 0.037 3、0.030 8、0.017 4;对农村用地的响应为负,降低 0.021 8;对林地、水域用地、未利用地响应微弱。总体而言,研究区土地利用变化剧烈,城乡建设用地大幅扩张,NDVI 变化趋势具有较好的规律性,对不同地类的响应特征差异明显。

**关键词:**土地利用;NDVI 变化规律;Google Engine 云平台;数据处理;哈尔滨市;响应特征

**中图分类号:** F323.211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)06-0221-05

国际组织“国际地圈与生物圈计划”(IGBP)和“全球变化人文因素计划”(IHDP)共同制定和推动“土地利用/覆盖变化(LUCC)科学研究计划”与“全球土地计划(globallandproject, GLP)”,着重研究以人类与自然生态环境耦合系统为中心的土地利用/覆被变化动态过程,使其成为全球气候与环境变化的重要内容<sup>[1-3]</sup>。作为 20 世纪以来最剧烈的土地利用/覆被变化类型,城市化在全球扩展,城市规模的大幅扩张对大气下界物质与能量交换、近地面生态环境格局、生物地球化学循环过程等影响日益加剧并成为当前学术研究的焦点<sup>[4-6]</sup>。中国正处于快速城市化的发展阶段,城市现代化进程更为明显,城市用地的空间拓展对周边地球陆表自然生态系统影响加剧,导致土地利用呈现出复杂且强烈的动态演化特征<sup>[7-8]</sup>。

快速的城市化导致城市内部及其周边植被出现退化或完全消失,而植被是陆地生态系统的重要组成部分,是连接土壤圈、大气圈以及生物圈的纽带和桥梁<sup>[9-10]</sup>。特别是城市及其周边植被变化,对调节城市气候、地表辐射能量平衡、碳收支与排放具有重要作用,适宜的植被对改善人居环境、生产空间、提升人居环境质量具有现实意义<sup>[11]</sup>。

目前,基于土地利用的植被覆盖指数(NDVI)研究大多采用较粗分辨率的数据源如 Modis<sup>[12]</sup>,或者较大的区域尺度如

东北地区<sup>[13]</sup>、省际<sup>[14]</sup>等。对基于 Landsat TM 30 m 局地尺度,特别是针对土地利用变化对城市周边地区 NDVI 影响的研究较少。因此,本研究阐释了 2000—2015 年快速城市化地区土地利用格局,并基于 Landsat TM 数据源和 Google Engine 云平台合成逐年 30 m 分辨率 NDVI,从更高精度揭示 NDVI 的变化规律,量化城市周边一定区域内 NDVI 对土地利用的响应特征,为了解该区域乃至东北地区土地利用格局与 NDVI 变化规律提供参考与借鉴。

## 1 研究区自然地理概况与数据处理

### 1.1 研究区自然地理概况

哈尔滨市位于中国东北平原,黑龙江省中南部,地理坐标为 125°42′11″~130°10′27″E、44°04′34″~46°40′09″N,区域土地总面积 5.384 万 km<sup>2</sup>,辖 9 区 7 县和 2 个县级市<sup>[15]</sup>,研究范围界定为香坊区、南岗区、道里区、道外区、平房区、松北区 6 个市辖区,该地区包含建成区及周边部分乡村聚落,是城市土地格局变化剧烈区域,2000 年老城区面积为 268.07 km<sup>2</sup>,到 2015 年增加到 517.03 km<sup>2</sup>。哈尔滨市属中温带大陆性季风气候,四季分明,冬季漫长寒冷,夏季短暂凉快,春秋季温度升降变化快,过渡性明显,年均降水量 569.1 mm,降雨集中月为 6—9 月,降雪集中月为 11 月至次年 1 月,最高月平均气温在夏季 7 月,为 23 ℃,最低月平均气温在冬季 1 月,为 -21 ℃。境内河流以松花江水系和牡丹江水系为主,包含松花江、阿什河、呼兰河等,水资源呈现自产水偏少、过境水丰沛、时空分布不均、东富西贫的特点。地形平坦、低洼,平原辽阔,东部多山及丘陵地,山势不高。土壤以黑土、草甸土、沙土及沼泽土为主,黑土居多,分布广泛,有机质含量高,适合农作物生长,草

收稿日期:2017-11-03

作者简介:王拾彝(1985—),男,山东黄县人,硕士研究生,主要从事土地利用与管理研究。E-mail:82246935@qq.com。

通信作者:雷国平,博士,教授,主要从事土地利用与规划研究。E-mail:guopinglei@126.com。

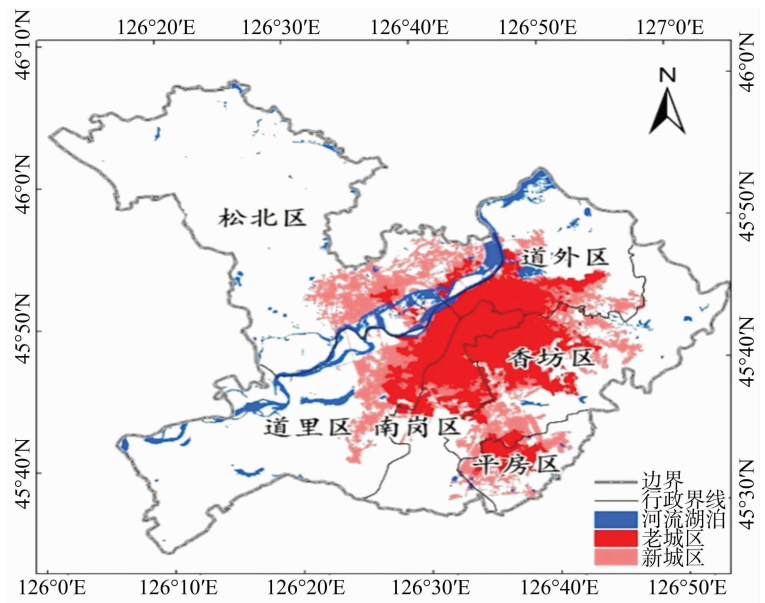


图1 研究区地理空间信息

甸土分布在沿江河低洼淋溶地带和松花江台地漫滩地带,沙土及沼泽土分布于江河两岸河滩和低洼地块,适于牧业、渔业发展。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 土地利用数据的获取 研究区 2000 年数据来源于“国家资源环境遥感信息平台 1:10 万数据集”<sup>[16]</sup>,为获得研究区 2015 年土地利用数据,依据“中国科学院土地利用变化地类代码分类系统”,将研究区土地利用地类分为耕地、林地、草地、水域用地、城乡建设用地(城市建设用地、乡村建设用地)、未利用地 6 个一级类<sup>[17]</sup>。在 NASA 官网下载清晰的影像,根据遥感影像的色彩、亮度、纹理等特征建立相应地类的解译标志,基于 2000 年数据进行人机交互式目视判读解译,获得 2015 年土地利用数据<sup>[18]</sup>,并进行地统计分析随机抽样,在野外用 GSP 进行实地地类验证,运用混淆矩阵(confusion matrix)将实地验证地类与解译地类综合在一起进行精度评价,2015 年地类精度为 91%,Kappa 系数( $\kappa$ )为 0.79。

1.2.2 2000—2015 年逐年 NDVI 最大值数据的获取 为获得较高精度的植被覆盖空间信息,本研究采用 NASA 官网(<http://landsat.usgs.gov>)下载研究区范围 2000—2015 年逐时间序列 Landsat TM/ETM/8OLI 影像,总计 368 景。基于 Google Engine 云平台,对影像进行空间配准、去云处理、异常值剔除、最大值合成、裁剪等操作,获得基于 Landsat 数据源 30 m 空间分辨率的 2000—2015 年逐年 NDVI 最大年值数据集。

2 结果与分析

2.1 土地利用时空格局分析

由表 1 可知,2000 年土地利用类型以耕地、城乡建设用地、未利用地为主,共计 1 832.17 km<sup>2</sup>,占总面积的 88.04%,其中耕地 1 109.24 km<sup>2</sup>、城乡建设用地 448.92 km<sup>2</sup>(城市建设用地 268.70 km<sup>2</sup>、乡村建设用地 180.22 km<sup>2</sup>),未利用地 274.01 km<sup>2</sup>。林地、草地、水域用地面积相对较小,分别为 143.41、30.24、75.18 km<sup>2</sup>。耕地几乎蔓延全境,林地、草地集

中与零散分布并存,水域用地呈蜿蜒长蛇状分布,城市建设用地、未利用地呈块状集聚分布,乡村建设用地呈点状随机分布。

表 1 2000—2015 年土地利用状况汇总

地类	土地利用面积			
	2000 年面积 (km <sup>2</sup> )	2015 年面积 (km <sup>2</sup> )	面积变化量 (km <sup>2</sup> )	面积变化率 (%)
耕地	1 109.24	1 052.41	-56.83	-5.12
林地	143.41	62.66	-80.74	-56.30
草地	30.24	22.43	-7.81	-25.83
水域用地	75.18	103.11	27.93	37.15
乡村建设用地	180.22	190.96	10.74	5.96
城市建设用地	268.70	517.03	248.33	92.42
未利用地	274.01	132.40	-141.61	-51.68
汇总	2 081.00	2 081.00	0.00	0.00

2000—2015 年城市化与工业化的高速发展、土壤侵蚀、土壤退化和弃耕等适宜性耕地资源的流失使得耕地资源非农化面积为 56.83 km<sup>2</sup>,现存面积 1 052.41 km<sup>2</sup>,降幅 5.12%。毁林垦荒和建设占用等人类活动的加剧,使得森林植被生态系统退化,林地面积损失 80.74 km<sup>2</sup>,现有面积 62.66 km<sup>2</sup>,降幅 56.30%。同时,草地损失 7.81 km<sup>2</sup>,现有面积 22.43 km<sup>2</sup>,降幅 25.83%。城乡居民生活供水、工业用水、农业灌溉、河湖湿地生态保水等需水量增加,促进了供水工程、河道整治工程、水资源配置工程等水利项目的实施,使得松花江流域哈尔滨段水域面积拓展 27.93 km<sup>2</sup>,达到 103.11 km<sup>2</sup>,增幅 37.15%。社会经济的快速发展、人口规模的集聚增长、城市功能和品位的不断提高,使得城市建设用地面积增加 248.33 km<sup>2</sup>,达到 517.03 km<sup>2</sup>,增幅 92.42%。城市侵占乡村面积微幅小于乡村居民点扩张和乡村路网建设面积,使得乡村建设用地增加面积较小,仅为 10.74 km<sup>2</sup>,现有面积 190.96 km<sup>2</sup>,增幅 5.96%。自然地理环境的恶化,生物多样性的丧失,耕地、建设用地、水域用地的侵占,使得未利用地减少 141.60 km<sup>2</sup>,现有面积 132.40 km<sup>2</sup>,降幅 51.68%。基于土地利用类型的空间变化格局(图 2),耕地形成北部微幅增加、中部及南部大幅减少的态势;林地、草地块状集聚分布态势减弱,部

分零散分布区消失;水域用地干流拓宽,支流增多,逐渐形成树枝状水系;未利用地羽状非对称地集中分布于河流两侧;城市

建设用地外延型扩张;乡村建设用地点状随机分布格局收缩,城市边缘乡村几乎全部消失,部分村庄由核心向外围扩展。

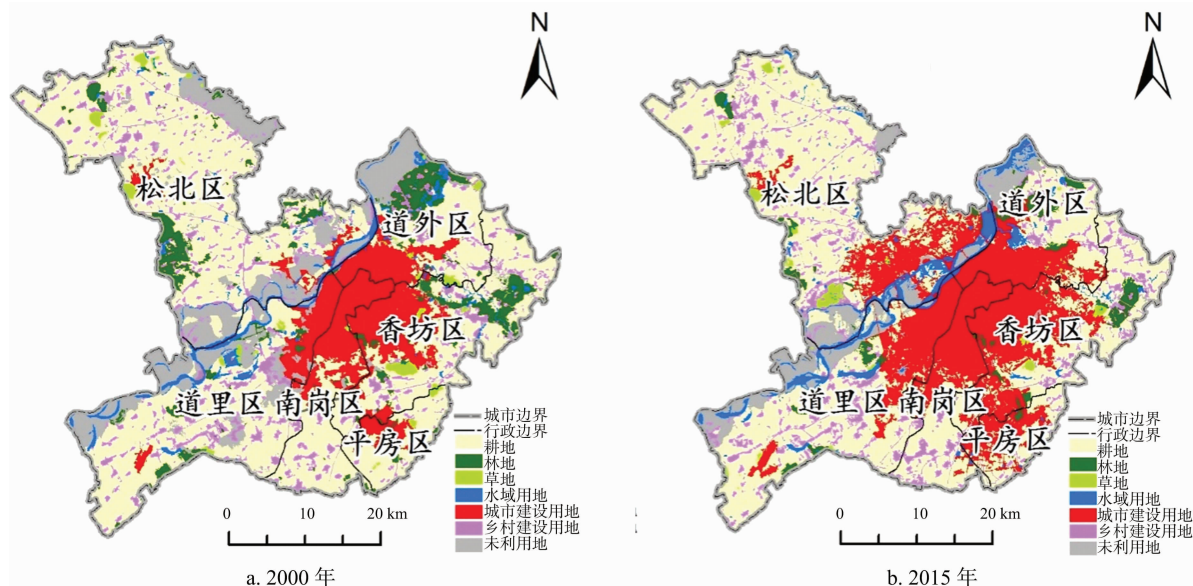


图2 2000、2015 年研究区土地空间分布格局

## 2.2 植被覆盖时空格局分析

图 3-a、图 3-b、图 3-c、图 3-d 为时序间隔 5 年的 NDVI 现状,21 世纪以来快速的城市扩张导致植被减少的区域主要集中在研究区中部的建成区。图 3-e 为 NDVI 均值的分布格局,2000—2015 年 NDVI 均值变化范围在区间  $[0, 0.80]$  之间,以  $(0.5, 0.8]$  为主,占全域面积的 73.02%,说明研究区植被状况较好。其中,区间为  $(0.5, 0.6]$ 、 $(0.6, 0.7]$ 、 $(0.7, 0.8]$  分别占 33.47%、27.06%、12.48%,在乡村地区呈现集中连片分布趋势,以乡村农田区域为主;区间为  $(0.3, 0.4]$ 、 $(0.4, 0.50]$  分别占 8.66%、7.00%,主要在新城区与乡村聚落扩张区域表现集中分布趋势,是 21 世纪以来城乡扩张分布区;区间为  $(0.1, 0.3]$  占 10.40%,主要分布在老城区;而区间  $[0, 0.1]$  主要分布在老城区北部以及河流地区。图 3-f 表示 2000—2015 年逐年均值的 NDVI 变化趋势,变化区间为  $[-0.50, 0.40]$ ,其中  $[-0.50, 0]$  占 34.62%、 $(0, 0.40]$  占 65.38%,NDVI 正值居多,说明研究区大部分植被在 2000—2015 年趋于增加趋势,区间  $(0, 0.10]$  占比达到总面积的 63.85%,呈现集中连片的分布格局,而区间  $(0.10, 0.40]$  仅占 1.52%,呈现随机的零散分布状况。NDVI 负值区主要分布在城市、乡村、河流地区,其中  $(-0.30, -0.10]$ 、 $(-0.10, 0]$  分占 11.68%、17.02%,占比较多,而  $[-0.50, 0.30]$  仅占 5.91%。

## 2.3 NDVI 对土地利用变化的响应研究

表 2 为 NDVI 变量对土地利用格局的响应特征。虽然 2000—2015 年耕地面积减少了 58.63 km<sup>2</sup>,但 NDVI 数值由 2000 的 0.607 0 增加到 2015 年的 0.644 3,增量 0.037 3。说明在耕地面积减少的条件下,NDVI 数据却在提高,该地区耕地作物产量提高,实地调查发现该区域以种植玉米为主,因此 21 世纪以来玉米产量增加。研究时段内,林地 NDVI 基本稳定,处于 0.724 0 左右。草地 NDVI 由 0.669 6 变为 0.700 4,增量 0.030 8,草地 NDVI 在草原面积减少 7.81 km<sup>2</sup> 情况下增

加,可能是温度、降水量等自然气候与人工围栏综合作用的体现。水域用地虽然面积增加明显,但水面基本处于无植被状态,其 NDVI 接近于 0。农村聚落在 2000—2015 年经济得到较好发展,聚落范围内,房屋以旧翻新、拆倒重盖、批地新建、庭院路面硬化,农村菜园(用于种植蔬菜、水果,基本用于自食的菜园)面积减少,房屋与菜园镶嵌复杂化,NDVI 由 2000 年的 0.244 4 降低到 2015 年的 0.222 6。城市用地在城市内部结构变化与外部扩张的综合作用下,NDVI 不仅未出现降低趋势,反而提高了 0.017 4,这主要源于城市内部绿地提升与城市外延性扩张中注重人居环境建设,有效增加绿地面积。未利用地 NDVI 有微幅增加,增量为 0.002 1。

总体而言,各地类 NDVI 由高到低依次为林地、草地、耕地、未利用地、城乡建设用地、水域用地,在 21 世纪以来土地利用格局发生明显变化的前提下,NDVI 对各个地类的响应程度由高到低为耕地、草地、城市建设用地、乡村建设用地以及基本不变的林地、水域用地、未利用地,其中耕地、草地、城市建设用地为正值,乡村用地为负值。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

本试验基于国家资源环境遥感信息平台 and Google Engine 云平台获取的 1:10 万 LUCC 数据集和处理的 30 m 分辨率逐年 NDVI 最大年值,开展快速城市化地区土地利用格局及 NDVI 的响应特征研究。结果显示,2000—2015 年哈尔滨市耕地非农化面积 56.83 km<sup>2</sup>,森林植被林地、草地退化 80.74、7.81 km<sup>2</sup>,水域拓展 27.93 km<sup>2</sup>,城乡扩张 259.07 km<sup>2</sup>,未利用地萎缩 141.61 km<sup>2</sup>。空间组织形态表现为:耕地形成北部小幅增加、中南部大幅减少的情形;林地、草地块状集聚分布态势减弱,部分零散分布区消失;水域用地干流拓宽,支流增多,逐渐形成树枝状水系;未利用地羽状非对称地集中分布于河流两侧;城市建设用地外延型扩张;乡村建设用地点状随机分



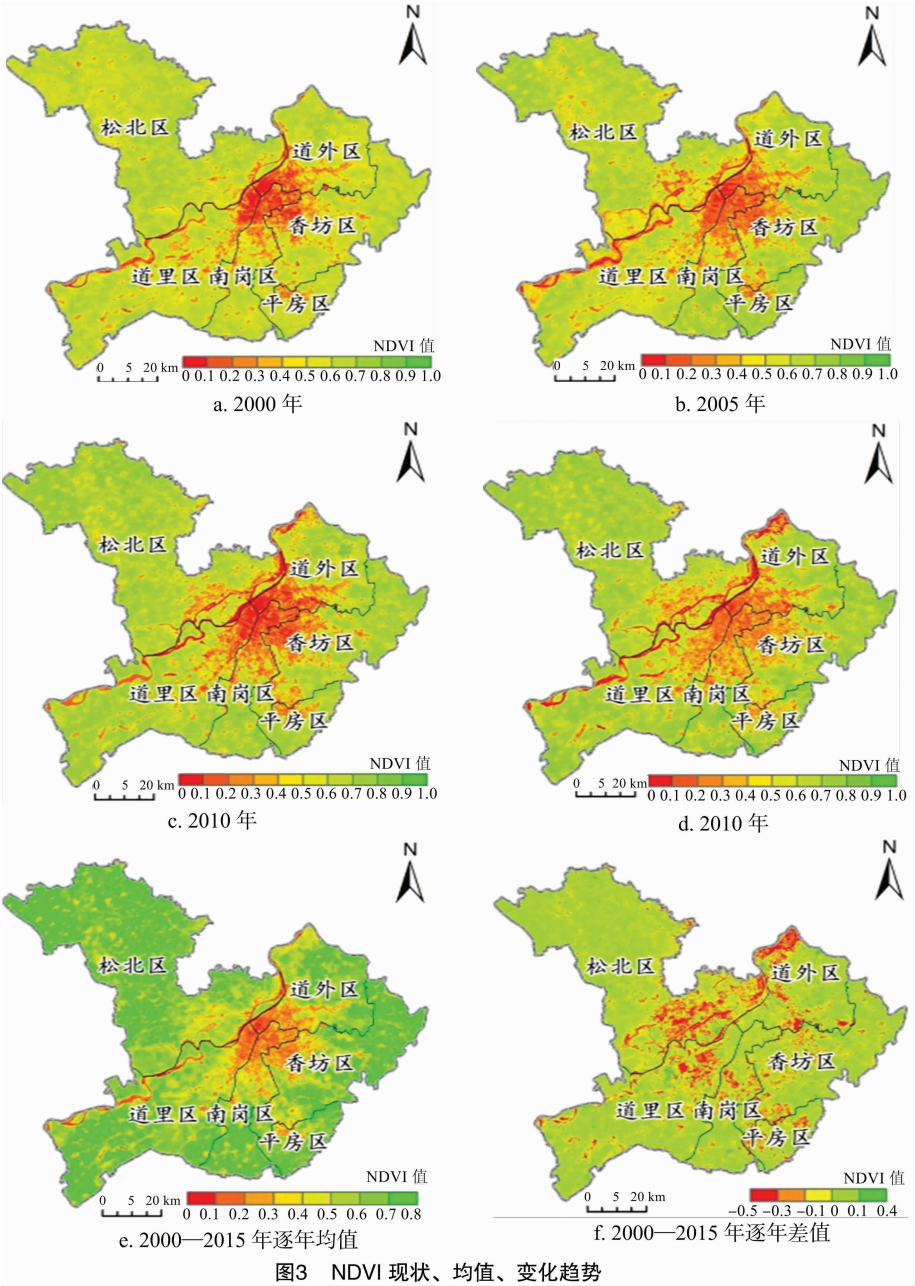


图3 NDVI 现状、均值、变化趋势

表 2 NDVI 变量对土地利用格局的响应特征

地类	NDVI		
	2000 年	2015 年	年均变量
耕地	0.607 0	0.644 3	0.037 3
林地	0.723 9	0.724 3	0.000 4
草地	0.669 6	0.700 4	0.030 8
水域用地	0.002 2	0.002 1	-0.000 1
乡村建设用地	0.244 4	0.222 6	-0.021 8
城市建设用地	0.209 5	0.226 9	0.017 4
未利用地	0.564 2	0.566 3	0.002 1

布局总体收缩,部分村庄由核心向外围扩展。NDVI 均值格局(图 3-e)说明研究区植被状况较好,主要分布区间为[0.5,0.8],占全域面积的 73.02%,以乡村农田分布区为主。同时,基于 Landsat 30 m 分辨率数据表明,区间(0.3,0.5]为

新城区和乡村扩张区域,区间(0.1,0.3]为老城区集中区域以及(0,0.1]为老城区北部和河流分布地区。NDVI 趋势的变化区间为[-0.50,0.40],负值占 34.62%,正值为 65.38%,表明大部地区植被趋于增加。随着土地利用格局的变化,NDVI 对耕地、草地、城市用地的响应为正,分别增加 0.037 3、0.030 8、0.017 4;对农村用地的响应为负,降低 0.021 8;对林地、水域用地、未利用地响应微弱。

3.2 讨论

本研究在 30 m 尺度下量化了 NDVI 对不同地类的响应特征,发现该区域 2000—2015 年间城市 NDVI 出现小幅增加的趋势,增量为 0.017 4,这可能是由于城市扩张和旧城区改造中更加注重绿地建设,有效增加绿地比例。说明该地区城市结构(人工建设不透水地表、绿地、裸土、水域)发生了改变<sup>[19]</sup>,因此探究城市化过程中“城市结构”对人居环境、地表

辐射能量平衡、碳收支与排放的影响成为该地区新的关注点。

研究区耕地、草地的 NDVI 具有增加趋势,耕地 NDVI 的增加更多地体现出人工干扰的结果,而草地 NDVI 的增加具有不确定性<sup>[20]</sup>,下一步应实地调查草地区域,确定人类是否对草地进行了人为干扰以及干扰的程度,同时植被的生长受气候影响较多,这其中温度、降水量、风速因子更为重要<sup>[21-25]</sup>,厘清植被生长与该因子的关系,对于指导农业生产、草地种植具有现实意义。

基于局地尺度开展基于 30 m 分辨率 2000—2015 年逐年时间序列的 NDVI 响应特征研究,从分析中取得部分研究成果。目前,缺少高分辨率、大尺度湿润指数、干旱指数的测算工作<sup>[26-27]</sup>,这对于应对近年来气候异常变化(厄尔尼诺等)、评估人居环境质量十分重要<sup>[28-29]</sup>,因此,基于 Google Engine 云平台,运用 Landsat NDVI 进行大尺度、长时间序列测算成为解决问题的途径之一。

## 参考文献:

- [1] Lambin E F, Baulies X, Bockstael N, et al. Land - use and land - cover change (LUCC). Implementation strategy: a core project of the International Geosphere - Biosphere Programme and the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change [R]. Global Change Report, 1995: 125.
- [2] Turner B L, Skole D, Sanderson S, et al. Land - use and land - cover change. Science/research plan [R]. Egs - Agu - Eug Joint Assembly, 1995.
- [3] Ojima D, Lavorel S, Graumlich L, et al. Terrestrial human - environment systems: the future of land research in IGBP II [J]. IGBP Global Change Newsletter, 2005 (50): 31 - 34.
- [4] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, 309 (5734): 570 - 574.
- [5] 匡文慧, 刘纪远, 邵全琴, 等. 区域尺度城市增长时空动态模型及其应用 [J]. 地理学报, 2011, 66 (2): 178 - 188.
- [6] Sui D Z, Zeng H. Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen [J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 53 (1/2/3/4): 37 - 52.
- [7] 陈明星, 陆大道, 刘 慧. 中国城市化与经济发展水平关系的省际格局 [J]. 地理学报, 2010 (12): 1443 - 1453.
- [8] Shi P J, Song C Q, Jing G F. Strengthening the study of land use/cover change and its impact on eco - environmental security - the trend of the study of the dynamics of human - nature system based on "Global Change Open Science Conference 2001" in Amsterdam [J]. Advances in Earth Sciences, 2002, 17 (2): 161 - 168.
- [9] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 [J]. Journal of Geophysical Research - Atmospheres, 2001, 106 (D17): 20069 - 20083.
- [10] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999 [J]. International Journal of Biometeorology, 2001, 45: 184 - 190.
- [11] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 中国东北地区植被 NDVI 对气候变化的响应 [J]. 生态学杂志, 2009, 6 (6): 1041 - 1048.
- [12] Miller R L, McKee B A. Using MODIS terra 250 m imagery to map

concentrations of total suspended matter in coastal waters [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93 (1/2): 259 - 266.

- [13] 刘宪锋, 张锦水, 朱秀芳, 等. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征 [J]. 地理学报 (英文版), 2014, 24 (2): 288 - 302.
- [14] 李双双, 延军平, 万 佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征 [J]. 地理学报, 2012, 67 (7): 960 - 970.
- [15] 2010 年黑龙江省第六次全国人口普查主要数据公报 [J]. 统计与咨询, 2011 (3): 20.
- [16] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Earth Sciences. Study on spatial pattern of land - use change in China during 1995—2000 [J]. Science in China (Series D), 2003, 46 (4): 373 - 384, Plate I - Plate III.
- [17] Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20 (4): 483 - 494.
- [18] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局 [J]. 地理学报, 2014, 69 (1): 3 - 14.
- [19] Weng Q H, Lu D S. A sub - pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10 (1): 68 - 83.
- [20] Justice C O, Vermote E, Townshend J, et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36 (4): 1228 - 1249.
- [21] 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2001, 26 (5): 412 - 418.
- [22] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究 [J]. 生态学报, 2012, 32 (11): 3404 - 3413.
- [23] 张玉斌, 王昱程, 郭 晋. 水土保持措施适宜性评价的理论与方法初探 [J]. 水土保持研究, 2014, 01 (1): 47 - 55.
- [24] 周晓飞, 雷国平, 徐 珊. 城市土地利用绩效评价及障碍度诊断——以哈尔滨市为例 [J]. 水土保持研究, 2012, 19 (2): 126 - 130.
- [25] 陈 亿, 尚可政, 王武功, 等. 21 世纪初中国北方沙尘天气特征及其与地面风速和植被的关系研究 [J]. 中国沙漠, 2012, 06 (6): 1702 - 1709.
- [26] Wen X. A new prompt algorithm for removing the bowtie effect of MODIS L1B data [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37: 5 - 10.
- [27] Setvak M, Rabin R M, Wang P K. Contribution of the MODIS instrument to observation of deep convective storms and stratospheric moisture detection in GOES and MSG imagery [J]. Atmospheric Research, 2007, 83 (2/3/4): 505 - 518.
- [28] Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Niño/southern oscillation activity at millennial timescales during the holocene epoch [J]. Nature, 2002, 420 (6912): 162 - 165.
- [29] Tudhope A W, Chilcott C P, McCulloch M T, et al. Variability in the El Niño - southern oscillation through a glacial - interglacial cycle [J]. Science, 2001, 291 (558): 1511 - 1517.