

基于干湿湿度规律的中国温带城市与区域 NDVI 空间变化研究

张雅倩, 马俊杰

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: [目的] 探索中国温带地区城市与区域生态差异的地带性规律, 为不同区域城市生态建设提供重要依据。[方法] 利用 250 m 空间分辨率 MODIS NDVI 遥感影像数据, 采用最大合成法和高斯函数拟合法, 选择中国从东部到西部的临沂、许昌、白银、吐鲁番和克拉玛依 5 个典型地级城市的植被归一化指数 (NDVI), 去探索中国温带地区城市与区域生态差异的地带性规律。[结果] 从城市中心到边缘 10 km 范围内, 由湿润区到极干旱区域, 城市与区域 NDVI 指数的变化呈现由“U”型—波浪型—“倒 U 型”的变化规律, 但干旱区与极干旱地区由于依托绿洲建设城市, 其 NDVI 指数可表现为“花 M 型”; 不同地带城市内部的 NDVI 指数有趋同现象, 但人为强化城市生态建设, 可有效提高城市 NDVI 指数。[结论] 按照不同地域城市与周边区域的 NDVI 关系, 在城市与周边区域 NDVI 呈“U 型”的城市, 应以楔入式引入型生态建设为主体, 在“倒 U 型”的城市, 应以圈层式防护型生态建设为主体。

关键词: 干湿湿度规律; 城市; 区域; NDVI; 空间变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0210-06

中图分类号: K921, Q948

文献参数: 张雅倩, 马俊杰. 基于干湿湿度规律的中国温带城市与区域 NDVI 空间变化研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 210-215. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 03. 035; Zhang Yaqian, Ma Junjie. Research on NDVI spatial variation of cities and region in temperate zone of China based on dryness and humidity regularity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 210-215. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 03. 035

Research on NDVI Spatial Variation of Cities and Region in Temperate Zone of China Based on Dryness and Humidity Regularity

ZHANG Yaqian, MA Junjie

(College of Urban and Environment Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: [Objective] To explore zonal regularity of ecological differences among different cities and regions in temperate zone of China and to discover the significance exerted on the development of urban green construction. [Methods] By employing the 250 m resolution data offered by NDVI MODIS remote sensing image and with the aid of the maximum synthesis method and Gauss's function fitting method, the study intended to explore zonal regularity of urban areas and regional ecological differences in temperate regions of China in terms of vegetation normalization index(NDVI), which covered Linyi, Xuchang, Baiyin, Turpan and Karamay 5 typical cities in China from east to west. [Results] Viewed from the humid region transition to the hyper-arid region, the change of urban and regional NDVI index presented a “U” type to wave type to “inverted U” changes regulations from center city to the <10 km edge and. However, because these cities rely on oasis in the arid area and hyper-arid region, NDVI index can be expressed as “M” type. In conclusion, the study demonstrated that NDVI index presented a convergence trend in different regions of the city, whereas, it can be effectively improved the city NDVI index by strengthening urban ecological construction artificially. [Conclusion] When NDVI index of a city is the “U” type, the urban green arrangement should be arranged

收稿日期: 2016-12-29

修回日期: 2017-02-22

资助项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目“基于城市物质代谢视角的生态城市建设研究: 以西安国际化大都市为例”(51208423)

第一作者: 张雅倩(1992—), 女(汉族), 山西省晋城市人, 硕士研究生, 研究方向为城市生态与环境。E-mail: xbchxyzyq@163.com。

通讯作者: 马俊杰(1962—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 教授, 博士生导师, 主要从事环境评价与规划。E-mail: xdhgvip@163.com。

with dot and line as the main part. When NDVI index of a city is the “inverted U” type, the city green arrangement should be arranged with several rings as the main part.

Keywords: dryness and humidity regularity; urban; region; NDVI; spatial variation

随着经济实力的不断提升,中国城市化进程已经进入中期(成长)阶段^[1]。城市化进程带动和促进了周边区域的发展,提高了城市居民生活质量,但同时也使城市与环境之间矛盾日渐突出,产生了环境污染、城市五岛效应(干岛、湿岛、热岛、雨岛及浊岛问题)^[2]、交通拥堵等问题。如何缓解城市环境污染与五岛效应,不同的学者从自然、生态、经济、社会等各种角度展开研究,在城市生态研究方面,常将城市空间分为城市灰色空间和城市绿色空间^[3]。城市灰色空间是指城市建筑以及功能性水泥、沥青地面所占据的空间(如停车场、道路)^[3];城市绿色空间是由具有光合作用的绿色植被与其周围光、土、水、气等环境要素共同构成的具有生命支撑、社会服务和环境保护等多重功能的城市地域空间^[4]。城市绿色空间在阻滞尘粒、涵养水源、净化空气等方面发挥着改善城市人居环境重要的作用^[5]。目前,城市绿色空间的研究主要集中在绿色空间的分布规律及空间特征,包含城市绿地与城市空间结构、绿色空间功能、绿色生态规划等^[3]。

城市绿色空间梯度变化逐渐受到国内外学者关注。如 Uy P D 等^[6]以越南河内为研究对象,Rafiee 等^[7]研究以马什哈德市为对象,Hahs 等^[8]以墨尔本为研究对象,分析了从城市中心到边缘的绿色空间分布规律。中国学者大多数从市域、城区的角度去探索城市绿色空间,如孙海清等^[9]以北京市作为研究对象,研究得出北京市绿地空间格局演变特征及影响因素;俞龙生等^[10]以广州市番禺区为对象,研究城区和城乡融合区演变特征,指出社会经济的快速发展是其景观格局显著变化及城乡融合区特征凸现的主要驱动因素。这些以单个城市为研究对象的城市生态研究,对于具体城市生态建设具有重要意义。但从大范围区域角度,探讨不同地域城市绿色空间及其梯度变化差异研究略显不足。

中国温带地区东西经度地带性规律明显。东部地区气候湿润、地势平坦,经济发达,人口密度大,城市数量多、规模大;西部地区气候干燥,土地荒漠化严重,人口密度小,城市数量少、规模小;中部地区气候相对干旱、降水量较少,城市发展水平介于东部和西部之间。由于受自然条件尤其是气候条件的影响,社会经济条件和城市建设理念的差异,东、中和西部城市及其生态建设也可能存在较大的差异,探究不同区域城市与周边区域的生态变化规律,对于宏观制定不同区域城市生态管理具有重要意义。

本文拟从大区域角度研究城市与腹地生态指标空间差异的变化规律,以中国温带地区干湿湿度变化规律为基础,以干燥度变化梯度为依据,从东到西选择临沂、许昌、白银、克拉玛依和吐鲁番等五个典型地级市为研究对象,利用 250 m 分辨率的植被遥感影像产品作为数据源,使用高斯函数拟合不同城市的 NDVI 数据,研究由城市中心向外 10 km 范围内 NDVI 数据的空间变化规律,总结不同区域城市生态建设特征,深化基于干湿湿度规律下城市生态建设变化规律认识,为强化不同地域城市生态建设与管理提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

中国温带地区东西经度范围广,干湿湿度分带明显,气候、植被、土壤地带性规律显著。考虑到气温条件和水分条件的差异,依据陈建伟^[11]提出的干湿湿度划分方法,可以将中国干湿气候区划分为 5 大区域,包括湿润区($K < 1$)、半湿润区($1 < K < 1.7$)、半干旱区($1.7 < K < 3$)、干旱区($3 < K < 8$)和极干旱区($K > 8$)。结合中国干燥度数据图,本文选取了 5 大区域内部 5 个典型城市为研究对象,具体包括湿润区的临沂市(a)、半湿润区的许昌市(b)、半干旱区的白银市(c)、干旱区的克拉玛依市(d)和极干旱区的吐鲁番市(e)。受地理位置和自然条件影响,城市发展绿化水平基础条件不尽一致。加之受城市建设的影响,不同城市绿色空间建设投入资金和政策有所不同,导致不同区域内城市绿地建设水平的差异。

1.2 数据来源与处理

本文使用数据主要来自美国国家航空航天局 NASA 网站(<http://glovis.usgs.gov>)提供的 MOD13 Q1 数据产品,其空间分辨率为 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$,地图投影为正弦曲线投影,每 16 d 合成一幅影像,2015 年 6 月至 9 月每个城市分别有 6 幅影像,详细的轨道号和时间见表 1。在数据处理中,首先对 NDVI 产品进行投影转换、影像拼接等预处理工作(影像统一投影为 UTM-WGS84);其次结合国家基础地理信息提供的我国各地级市边界,裁剪出 5 个典型地级市的研究范围;再次,使用最大合成法,利用 ARGGIS 软件对 5 个典型地级市夏季 NDVI 值进行提取;最后使用 OriginPro 8 软件,绘制 NDVI 空间变化曲线,比较分析城市与区域 NDVI 分布差异。

表 1 城市样点相关信息

区域	典型地级市	城市中心点			干燥度	MODIS NDVI 影像轨道号	影像时间
		名称	经度/(°)	纬度/(°)			
湿润区	临沂	羲之公园东北角	35.069	118.338	0.914	h27 v5	20150610
半湿润区	许昌	春秋广场东北角	34.027	113.822	1.211	h27 v5	20150626
半干旱区	白银	文化广场中心	36.539	104.184	2.763	h25 v5	20150712
干旱区	克拉玛依	人民广场西南角	45.597	84.864	7.631	h23 v4	20150728
极干旱区	吐鲁番	旅游文化广场中心	42.942	89.182	73.753	h24 v4	20150813
							20150829

注:每个典型地级市所获取 MODIS NDVI 合成影像时间相同。

1.3 研究方法

1.3.1 最大合成法 NDVI 可以表征区域植被状况^[12]。为了消除不同时期影像的云、大气、太阳高度角等因素对 NDVI 产品的干扰,采用目前国际上通用的最大合成法(maximum value composites, MVC),以计算的 5 个典型城市夏季 6,7,8 月 NDVI 最大值作为各城市的 NDVI 值,具体见公式 1:

$$M_{(NDVI_i)} = \max_{(NDVI_{ij})} \quad (1)$$

式中: $M_{(NDVI_i)}$ ——第 i 个像元的夏季 NDVI 最大值; $NDVI_{ij}$ ——第 i 个像元第 j 幅影像的 NDVI 值。

1.3.2 采样方法 对于每一个城市而言,首先选取城市中心附近具有明显标志的地物作为中心点,以中心点为参照,设置 E-W, N-S, SE-NW, NE-SW 4 个方向的射线,并以 250 m 为间距设置 40 个同心圆,利用 ARCGIS 中的值提取点工具,提取各条射线和同心圆交点(采样点)的距离和 NDVI 值。以 N, NE, E, SE 向为正向,以 S, SW, W, NW 向为负向,绘制每条射线上的 NDVI 变化曲线。

1.3.3 高斯函数拟合 高斯函数曲线是由无数个离散点 (X_i, Y_i) ($i=1, 2, 3$ 等)构成的曲线^[13]。每一个高斯函数均由 4 个参数决定,峰高 A 、峰位 X_c 、半宽 W 和偏移量 Y_0 。其中峰高 A 决定高斯函数的开口方向和峰的高度;峰位 X_c 决定峰的中心位置,即达到峰高时对应的 X 坐标; Y_0 为基准偏移量;半宽度 W 为当纵坐标达到 $(Y_0 + A/2)$ 时所对应的横坐标与峰位的差值除以 2 的值,代表峰的横向宽度。具体函数形式如公式 2 所示:

$$Y = Y_0 + A * \text{EXP}[-0.5 * (\frac{x - x_c}{w})^2] \quad (2)$$

式中: Y_0 ——城市周边区域的指数水平。

2 结果与分析

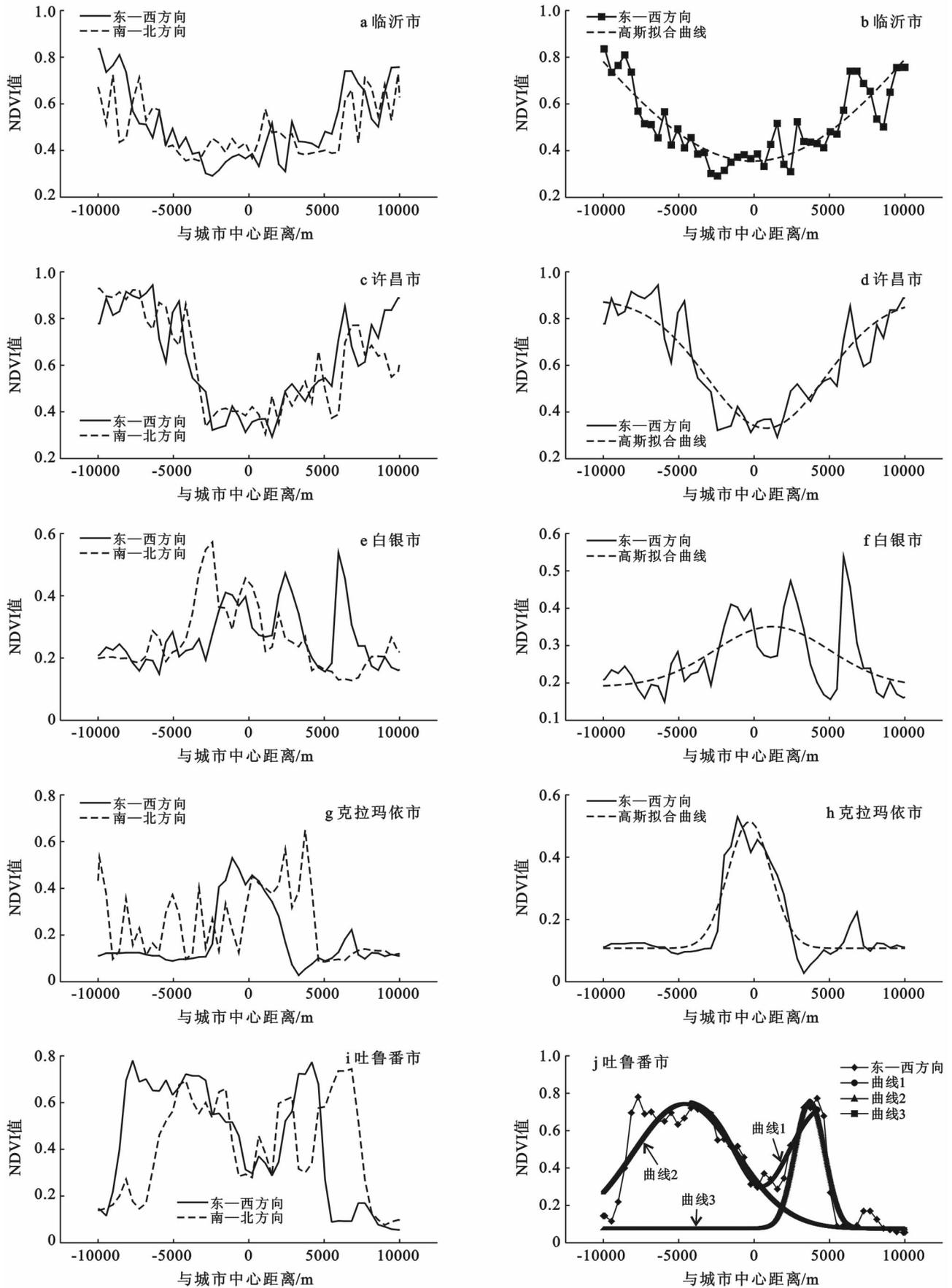
受人类活动的影响,不同城市从城市中心到城市边缘腹地,土地利用类型差异较大,变化较为复杂,城市建筑与绿化等呈现空间犬牙交错、杂乱无章的特征^[9]。通过每个城市 4 个方向的 NDVI 值变化观察,发现不同方向上曲线波动差异较大,本文选取了东—

西和南—北 2 个方向作为典型方向来探讨不同城市 NDVI 空间变化规律,并以东—西向为样本,利用高斯函数拟合其空间变化特征(图 1)。

从图 1a 可知,在临沂市东西和南北 2 个方向上,从城市中心到城市边缘区 NDVI 值变化趋势呈“U 型”,即城市中心低于城市腹地区域。在东西方向上,距离城市中心西 5 940 m,西 8 580 m,西 10 000 m,东 1 540 m,东 2 860 m,东 6 820 m 大多数为农田和河岸绿化。在南北方向,距离城市中心南 7 260 m,南 9 020 m,北 7 700 m,北 9 900 m 各分布着双月湖公园中绿地、罗主动物园和农田等。从图 1b 和表 1 可知,高斯拟合曲线的 A 值为 -1.452 2, W 值为 11 918.76 m, Y_0 值为 1.807。说明临沂市城市 NDVI 小于周边区域,城市面积较大,周边区域 NDVI 最高。

从图 1c 可知,许昌市东西和南北两个方向 NDVI 值从城市中心到城市边缘的总体趋势临沂市一致,均呈“U 型”曲线。但在东西方向上,距离城市中心西 6 380 m,东 10 000 m 的 NDVI 值高于城市中心,原因在于距离城市中心 4 620 m 以上,大多数为城市周边的农田和在建的香山公园。从南北方向看,城市北 7 060 m 处出现峰值,原因是城市周边镶嵌农田的影响。从图 1d 和表 1 可知,高斯拟合曲线的 A 值为 -0.552, W 值为 3 918.767 m, Y_0 为 0.883,说明许昌市城市 NDVI 小于周边区域,城市面积和周边区域 NDVI 小于临沂市。

从图 1e 可知,白银市东西和南北两个方向 NDVI 值波动较大,城市绿地与城市灰色建筑镶嵌分布特征明显。在东西方向上,距城市中心西 2 420 m,西 8 580 m,东 2 420 m 和东 5 940 m 处曲线出现峰值,其原因在于东西方向上分布着带状绿地、农田、西山公园和林地。在南北方向上,距城市中心南 220 m,南 2 420 m,南 6 380 m,北 9 460 m 处分布着白银文化广场、街旁绿地、农田和林地等 4 个峰值。从图 1f 和表 1 可知,高斯拟合曲线的 A 值为 0.161, W 值为 3 813.463 m, Y_0 为 0.190,说明白银市城市 NDVI 略大于周边区域,城市面积与许昌相近,但周边区域 NDVI 小于临沂和许昌市。



注:曲线 1 为除去吐鲁番市外层的绿洲距离的拟合高斯曲线曲线;曲线 2 和 3 分别代表根据实际曲线(东西方向)左、右峰值分别拟合两个高斯曲线。表 2 同。

图 1 5 个典型城市 4 个方向上 NDVI 曲线(左)和东西方向上高斯拟合曲线(右)

从图 1g 可知,克拉玛依市东西方向上 NDVI 值变化最为显著,呈现“倒 U 型”,表现为城市中心高于城市腹地区域。东西方向上,距离城市中心西 1 100 m,东 6 820 m 处出现高数值,原因在于分布着生态公园和河滨绿化;南北方向上,距离城市中心北 3 740 m 出现最高峰,主要与大面积苗圃有关。从图 1h 和表 1 可知,高斯拟合曲线的 A 值为 0.407, W 值为 1 418.240 m, Y_0 为 0.190,说明克拉玛依市城市 NDVI 大于周边区域,城市面积最小,与前述城市相比,其周边区域 NDVI 很小。

从图 1i 可知,吐鲁番市 NDVI 值梯度变化东西方向要比南北方向显著,呈“花 M 型”,表现为城市内部低、四周高、外围更低的趋势。东西方向上,受城市

周边农田的影响,距离城市中心东 4 180 m 处和西 7 700 m 处的 NDVI 值达到最大。南北向上,受北边城市周边农田、南边农田和沙漠植物园的影响,距离城市中心北 5 149 m 和南 4 180 m, NDVI 指数达到高数值。从图 1j 和表 1 可知,高斯拟合曲线 1 的 A 值为 -0.465, W 值为 1 788.762 m, Y_0 为 0.768,说明吐鲁番市城市 NDVI 小于周边区域,城市面积较小,周边区域 NDVI 较高。

进一步分析发现,吐鲁番市周边均为绿洲,通过对东、西两侧绿洲的拟合(曲线 2, 3),发现绿洲外围的峰高(A)大于 0,偏移量(Y_0)仅为 0.077,说明绿洲外围更大范围区域的 NDVI 是本研究所选城市周边区域中最小的区域。

表 2 不同城市高斯函数拟合参数表

区域	典型地级市	峰高(A)		半宽度(W)		中心(X_c)		偏移量(Y_0)		
		数值	误差	数值	误差	数值	误差	数值	误差	
湿润区	临沂	-1.452	2.125	11 918.76	10 287.86	-71.56	228.31	1.807	2.137	
半湿润区	许昌	-0.552	0.043	3 918.77	447.24	793.99	236.77	0.883	0.042	
半干旱区	白银	0.161	0.036	3 813.46	1 249.48	1 201.88	691.39	0.190	0.034	
干旱区	克拉玛依	0.407	0.024	1 418.24	103.81	-302.89	95.36	0.108	0.008	
		曲线 1	-0.465	0.049	1 788.76	261.22	500.41	121.25	0.768	0.051
		极旱区	吐鲁番	曲线 2	0.683	0.061	988.35	102.05	3 701.90	102.05
曲线 3	0.435	0.048		1 729.62	253.85	564.19	130.85	0.077	0.047	

图 2 是典型城市干燥度与高斯拟合曲线 Y_0 值的关系。由图 2 可知, Y_0 值与干燥度呈现显著的幂函数反相关关系($R^2=0.98$)。即随着干燥度的增加,不同区域内城市的 Y_0 值逐渐降低。

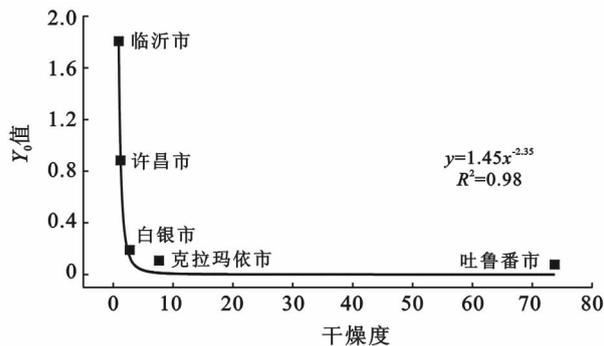


图 2 城市干燥度与高斯拟合曲线 Y_0 值的关系

由图 3 中可以看出,5 个典型城市中心 NDVI 峰值(A)变化于 0.262~0.510,其中克拉玛依市最大(0.51039),吐鲁番市最小(0.2622)。临沂市、许昌市和白银市分别为 0.35197, 0.32837, 0.35393,其 NDVI 值相差较小。说明这 3 个典型城市中心的 NDVI 值趋向于一致,绿化水平相近。

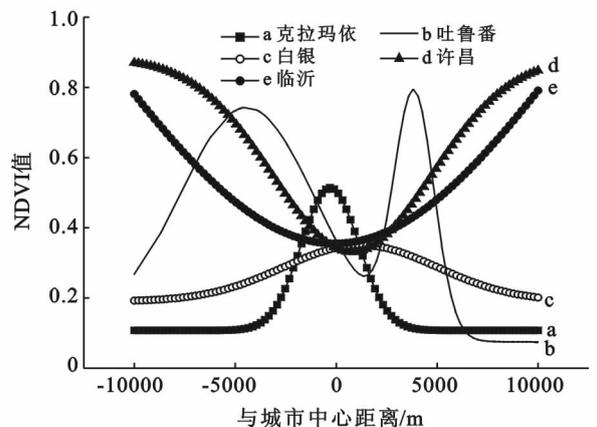


图 3 不同区域城市高斯拟合

3 讨论与结论

3.1 结论

本文对比分析了 5 个典型城市 NDVI 拟合曲线,发现高斯函数拟合效果较好(除白银市外, R^2 均大于 0.75),但不同城市差异很大,而这种差异具有一定程度的合理性,并呈现明显的空间分异的规律。

(1) 不同城市与区域 NDVI 值与干燥度呈负相关关系。在大尺度背景下,城市建设所依的区域

NDVI在递减,这种规律符合在中国温带地区的经度地带性规律。

(2) 不同城市内部 NDVI 总体趋同,但极端气候和过强投入对城市 NDVI 有不可忽视的影响。高斯拟合曲线在城市中心 NDVI 值代表着城市中心绿化水平。克拉玛依市虽地处戈壁,但由于以石油产业为主,人均 GDP 远高于全国其他城市,城市生态建设意识超前,超常规的城市生态建设投入,使得其城市生态水平明显领先于其他城市。吐鲁番市虽地处吐鲁番盆地,但城市周边以绿洲农业开发为主,其城市生态建设资金有限,加之气候极度干旱,降水极少,城市绿化水平最低。

(3) 城市与区域 NDVI 空间变化由“U 型”向“倒 U 型”变化,干旱区“花 M 型”普遍。以临沂市和许昌市为代表的中国温带湿润和半湿润地区,城市 NDVI 拟合曲线呈“U 型”(A<0)(图 3 和表 2)。说明在湿润和半湿润地区,由于降水条件较好,城市建设的区域生态背景优越,城市建设用地开发对区域生态冲击明显,城市生态水平明显降低。

在中国半干旱区,白银市 NDVI 曲线呈“波浪型”,拟合曲线呈不显著的“倒 U 型”(A=0.16, R²=0.293 8)(图 3 和表 2),说明城市中心绿化水平稍大于城市外围绿化。原因在于白银市地处半干旱区,多年平均降水量为 250 mm,区域生态背景较差。结合其与湿润、半湿润区的临沂市和许昌市的空间关系,可以猜想,在中国半干旱区降水量约 300 mm、干燥度约 2.5 的城市,其城市与区域生态水平大体相当,NDVI 拟合曲线呈现由“U 型”到“倒 U 型”的转换。在中国干旱地区和极干旱地区,NDVI 拟合曲线呈显著的“倒 U 型”(A>0)(图 3 和表 2),呈这种分布特征的有克拉玛依市和吐鲁番市,其中以克拉玛依市为典型代表。但在中国干旱和半干旱地区,绿洲作为水资源最为丰富的地区,常作为区域产业发展和城市建设的依托区,城市与周边区域常呈现“荒漠—绿洲—城市—绿洲—荒漠”的地域分布格局,其 NDVI 分布也常呈现出“花 M 型”特征,即城市中心的低值区—绿洲的高值区—荒漠戈壁的最低值区的特点。

不同城市及其区域 NDVI 空间变化规律与城市生态建设模式的选择。中国温带地区从东部到西部,随着干燥度增加,由典型城市中心至 10 km 范围内 NDVI 呈现为“U 型”—“波浪型”—“倒 U 型(或花 M 型)”的变化规律,反映了不同城市与周边区域的空间生态关系。对于湿润和半湿润地区,城市与周边区域 NDVI 呈“U 型”分布特点,说明城市建设所塑造的以建筑为主的生态条件,劣于周边区域以自然或农

业为主的生态条件。对于干旱与半干旱地区,城市与周边区域 NDVI 呈“倒 U 型”分布特点,说明城市只要充分重视城市生态或绿化建设,就能形成虽以建筑为主体但绿化明显高于周边以荒漠、戈壁为主体的生态条件。在此种条件下,城市周边的干旱、高温、风沙等生态因子,均会严重影响城市生态系统的建设与维护。

3.2 讨论

基于不同干湿度区域内城市 NDVI 曲线呈“U 型”—“波浪型”—“倒 U 型(或花 M 型)”的变化规律,在不同城市生态建设中,建议采取相应的绿化体系建设策略。对于湿润和半湿润地区的城市,城市生态建设要充分借助空气流通、水体流动、动植物传播等自然过程,把城市周边区域的各种生态因子引入城市。即在充分考虑城市主导风向的基础上,合理控制建筑高度,预留城市风道,利用河流湿地、道路绿化、电力走廊等建设城市楔形蓝带和绿带,并将其与城市内部的点、线、面状绿化有机结合,形成以楔入式引入型为主体的生态建设格局,将会显著改善城市生态状况,节约城市生态建设投资。

对于干旱与半干旱地区的城市,城市建设充分考虑应对区域严酷生态因子对城市生态系统的冲击,并通过强化城市内部点、线、面状绿化系统建设及其维护,形成以圈层式防护型为主体的生态建设格局。在依托绿洲建设的城市,应充分研究绿洲水资源对城市发展的支撑作用,但应充分重视绿化建设和管理中节水措施的应用,减少水资源消耗。

[参 考 文 献]

- [1] 方创琳,刘晓雨,蔺雪芹. 中国城市化发展阶段的修正及规律性分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(4): 512-523.
- [2] 周淑贞. 上海城市气候中的“五岛”效应[J]. 中国科学: B 辑, 1988, 11: 1226-1234.
- [3] 杨振山,张慧,丁悦,等. 城市绿色空间研究内容与展望[J]. 地理科学进展, 2015, 34(1): 18-29.
- [4] 常青,李双成,李洪远,等. 城市绿色空间研究进展与展望[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1640-1646.
- [5] 李锋,王如松. 城市绿色空间生态服务功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 527-531.
- [6] Uy P D, Nakagoshi N. Analyzing urban green space pattern and eco-network in Hanoi, Vietnam[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2007, 3(2): 143-157.
- [7] Rafiee R, Mahiny A S, Khorasani N. Assessment of changes in urban green spaces of Mashad city using satellite data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009, 11(6): 431-438.

- tropical paddy soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014,14(1):1-9.
- [2] 贾曼莉,郭宏,李会科.渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2777-2784.
- [3] 方丽娜,杨效东,杜杰.土地利用方式对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4):837-844.
- [4] 巩晟萱,王丹,戴伟,等.不同生长时期丝栗栲林下土壤有机碳含量及矿化特征[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 59-63.
- [5] 王若梦,董宽虎,何念鹏,等.围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(12):3622-3629.
- [6] Cheng Xiaoli, Yang Yuanhe, Li Ming, et al. The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1):415-424.
- [7] Liu Yong, Wang Cheng, Yue Wenzhe, et al. Storage and density of soil organic carbon in urban topsoil of hilly cities: A case study of Chongqing Municipality of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(1):26-34.
- [8] 马昕昕,许明祥,杨凯.黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探[J]. *环境科学*, 2012, 33(11): 3893-3900.
- [9] Gao Junqin, Ouyang Hua, Lei Guangchun, et al. Effects of temperature, soil moisture, soil type and their interactions on soil carbon mineralization in Zoigê Alpine Wetland, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(1):27-35.
- [10] 贡璐,张雪妮,吕光辉,等.塔里木河上游典型绿洲不同土地利用方式下土壤质量评价[J]. *资源科学*, 2012, 34(1):120-127.
- [11] 李衍青,蒋忠诚,罗为群,等.植被恢复对岩溶石漠化区土壤有机碳及轻组有机碳的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4):158-163.
- [12] 严毅萍,曹建华,梁毅,等.桂林毛村岩溶区三种亚类石灰土有机碳矿化研究[J]. *地球与环境*, 2012, 40(2): 219-226.
- [13] 王莹,刘淑英,王平.不同土地利用方式下秦王川灌区土壤活性有机碳库的变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(5):103-108.
- [14] 马忠明,吕晓东,刘莉莉.耕作方式对绿洲灌区农田土壤有机碳及其分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1):122-128.
- [15] 郝瑞军,方海兰,沈烈英.城市典型人工林土壤有机碳含量及其矿化特征比较[J]. *园林科技*, 2011, 119(1):7-12.
- [16] Mi Jia, Li Jianjun, Chen Dima, et al. Predominant control of moisture on soil organic carbon mineralization across a broad range of arid and semiarid ecosystems on the Mongolia Plateau [J]. *Landscape Ecology*, 2015, 30(9):1683-1699.
- [17] 张文娟,廖洪凯,龙健,等.贵州喀斯特山区土地利用对土壤有机碳及其周转速率的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5):1297-1303.
- [18] 王翠萍.不同土壤微生物量碳与有机碳矿化的关系研究[J]. *广东农业科学*, 2013, 34(11):52-54.
- [19] 杨添,戴伟,安晓娟,等.天然林土壤有机碳及矿化特征研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(3):1105-1110.
- [20] 李忠佩,张桃林,陈碧云.可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4):544-552.
- [21] 戴慧,王希华,阎恩荣.浙江天童土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(7):1021-1026.

(上接第 215 页)

- [8] Hahs A K, McDonnell M J. Selecting independent measures to quantify Melbourne's urban-rural gradient [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78(4):435-448.
- [9] 孙海清,许学工.北京绿色空间土地分析及适应性管理研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2008, 7, 44(4): 632-638.
- [10] 俞龙生,符以福,喻怀义,等.快速城市化地区景观格局梯度动态及其城乡融合区特征:以广州市番禺区为例 [J]. *应用生态学报*, 2011, 1(22):171-180.
- [11] 陈建伟,张煜星.湿润指数与干燥度关系的探讨[J]. *中国沙漠*, 1996, 16(1):79-82.
- [12] 成方妍,刘世梁,尹艺洁,等.基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(3):1-10.
- [13] 李敏,盛毅.高斯拟合算法在光谱建模中的应用研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10)2352-2355.