

doi: 10.6046/zrzyg.2021224

引用格式: 左璐,孙雷刚,鲁军景,等. 基于MODIS的京津冀地区生态质量综合评价及其时空变化监测[J]. 自然资源遥感, 2022,34(2):203–214. (Zuo L, Sun L G, Lu J J, et al. MODIS-based comprehensive assessment and spatial-temporal change monitoring of ecological quality in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022,34(2):203–214.)

基于MODIS的京津冀地区生态质量综合评价及其时空变化监测

左璐^{1,2}, 孙雷刚^{1,2,3}, 鲁军景^{1,2}, 徐全洪^{1,2}, 刘剑锋^{1,2}, 马晓倩^{1,2}

(1. 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050021; 2. 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 石家庄 050021; 3. 巨鹿县应用技术研究院, 邢台 055250)

摘要: 生态质量评价是保障人类生产生活与生态环境协调稳定、实现区域社会经济可持续发展的重要前提, 利用遥感技术快速、准确、客观地定量评价区域生态质量已成为一种新的趋势。选取2001年、2010年、2019年京津冀地区的MODIS遥感数据产品, 提取出反映绿度、湿度、热度和改进的干度4个重要指标, 利用主成分分析法得到MODIS遥感生态指数(MODIS remote sensing ecological index, RSEI_M), 对京津冀地区2001—2019年近20 a间的生态质量状况进行综合评价及变化监测。结果表明: ①京津冀地区生态质量区域差异明显, 北部燕山及西部太行山一带生态质量好, 冀西北张家口及冀东南城市中心区生态质量差; ②2001年、2010年和2019年, 京津冀地区的RSEI_M均值分别为0.556、0.583和0.527, 生态质量整体呈下降趋势; ③2001—2019年, 京津冀地区生态质量改善和退化的面积占比分别为20.18%和35.69%, 空间分布上呈现出西北改善、东南退化的格局。西北部生态改善的主要原因在于降水量增加、温度升高等水热条件变化及一系列的人为保护措施; 东南部生态退化的主要原因在于城镇化的快速推进及社会经济活动的增强。基于MODIS数据可有效实现区域大范围的生态质量综合评价, 为区域社会经济绿色高质量发展提供参考。

关键词: 生态质量; 综合评价; 遥感监测; MODIS; 时空变化

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)02-0203-12

0 引言

我国工业化、城市化进程的明显加快, 人口的激增和城市扩张, 加剧了对生态环境的干扰和破坏, 环境污染、资源短缺、生态系统退化等生态环境问题日益突出, 成为制约我国社会经济发展的重要瓶颈^[1-2]。生态环境是人类生存的基础条件, 生态质量的好坏直接影响人类居住环境与社会经济发展的协调稳定。因此, 建立科学准确的生态质量评价体系和量化模型, 客观认识和评价区域的生态质量状况和变化情况, 对于实现区域社会经济绿色、高质量发展具有重要的指导意义^[3]。京津冀地区人口增长与经济发展迅速, 城镇化水平不断提高, 植被退化、城市热岛等生态环境问题

突出, 如何定量评价该区域生态质量状况及其变化情况, 成为生态学、经济学、地理学等相关学科的研究热点^[4]。

生态质量评价按照特定评价标准, 分析一定时空尺度上生态环境质量状况以及变化, 进而体现生态环境的好坏优劣, 以及对人类生存和社会发展的适宜性^[5]。众多学者采用压力-状态-响应模型(pressure-state-response, PSR)^[6-7]筛选指标体系, 运用层次分析法^[8-9]、综合指数评价法^[10]、模糊评判法^[11]、聚类分析法^[12]等定性定量方法评判生态环境质量的好坏优劣。潘洋等^[13]采用层次分析法构建了包括土地环境状况、水环境状况、人体感受等8大要素28个指标的评价体系, 运用综合指数法对广西金秀地区的生态环境质量进行综合评价。但这些方法易受人为主观因素的影响, 加上社会经

收稿日期: 2021-07-01; 修订日期: 2021-11-16

基金项目: 河北省科学院科技计划项目“河北省区域生态质量动态监测评价及提升研究”(编号: 20104)、河北省科学院高层次人才培养与资助项目“河北省生态环境质量遥感评价及其时空变化”(编号: 2019G16)和“基于遥感植被指数时间序列的人工林演变研究”(编号: 2020G03)共同资助。

第一作者: 左璐(1991-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为生态遥感及资源环境监测。Email: zuol.14b@igsnnr.ac.cn。

通信作者: 孙雷刚(1984-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为城市生态学。Email: sunleigang3s@163.com。

济等统计数据的获取难度,一定程度上限制了其使用。随着遥感技术的发展,客观高效、快速准确、时空连续的多源遥感数据被广泛应用于生态环境研究中^[14-15]。

国家环保部发布的《生态环境状况评价技术规范》提出了生态环境状况指数(ecological index, EI),该指数基于植被覆盖指数、水网密度指数、生物丰度指数、土地胁迫指数和污染负荷指数等构建,其中前3个可由遥感直接获取,其他则需结合地面观测和各地区年度统计数据,受地域、时间、尺度的限制较大,且各指标权重的确定忽略了区域本身的差异。徐涵秋^[16-17]基于EI,利用Landsat卫星数据提取的绿色、热度、湿度、干度指标,构建了遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),被广泛应用于市域、县域等小范围的生态质量评价^[18-20]。但Landsat数据时间分辨率较低,受天气、地形等条件的影响难以获取区域内同一时期的高质量影像。MODIS数据具有较好的空间分辨率,时间序列完整,空间跨度大,利用MODIS数据构建遥感生态指数,对于实现省级、国家级等大范围的生态质量遥感综合评价具有重要意义^[21-22]。本文基于MODIS数据,提取了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、地表含水量指数(surface water content index, SWCI)、地表温度(land surface temperature, LST)和MODIS建筑-裸土指数(MODIS normalized difference built-up and soil index, NDSI_M),用来代表生态环境绿色、湿度、热度和干度,构建MODIS遥感生态指数(RSEI_M),实现了京津冀地区的生态环境质量综合评价及动态监测。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

京津冀地区位于环渤海心脏地带,包括北京市、天津市和河北省全域(E113°27'~119°50', N36°05'~42°40')。地势由西北向东南倾斜,地貌复杂多样。该地区属暖温带季风气候,年均降雨量为400~800 mm。植被分布具有明显的地带性和垂直性规律,冀西北高原以草原草甸为主,冀北山间盆地主要为针叶林、阔叶林及灌丛,太行山及燕山山地丘陵以灌木和灌草丛为主,冀东南平原大多为耕地和人工植被。

京津冀地区是中国北方的经济核心区,与长三角城市群、珠三角城市群并称为我国三大城市群,总面积21.8万km²,占全国国土面积的2.3%。2018年常住人口约1.13亿人,占全国总人口的8.08%,

地区生产总值约8.51万亿元,占国内生产总值的9.46%。1980—2015年,京津冀地区城市化率由19.63%增长到58.28%,年均增长率为2.19%^[23]。

1.2 数据源及其预处理

遥感数据来源于美国MODIS数据产品网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),本文选取覆盖京津冀地区的H26V04, H26V05, H27V04, H27V05共4景影像范围,数据产品为地表反射率(MOD09A1)和地表温度产品(MOD11A2),2种产品均经过辐射校正和大气校正等预处理,具有可靠的精度和质量。MOD09A1由可见光到短波红外的7个波段(620~2155 nm)组成,空间分辨率为500 m,时间分辨率均为8 d。MOD11A2为1 km分辨率的地表温度产品,包含白天和夜间地表温度,时间分辨率也为8 d。获取时间为2001年、2010年及2019年的7—9月份,该时期京津冀地区植被生长旺盛,便于区分植被和非植被。

基于以上遥感产品计算得到各指标因子,经过拼接裁剪、投影转换、重采样等操作后,得到空间信息统一的各指标栅格数据。筛选晴空无云的高质量数据,计算得到各指标7—9月的平均值,作为后续构建综合遥感生态指数的数据基础。

气象数据为中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)下载的“中国地面气候资料日值数据集”,选取京津冀地区25个气象站点的气温、地表温度、降水量和相对湿度数据。该数据根据国家规范标准制作,经过了异常值检验和缺省剔除,精度可信。统计数据来源于《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》及《河北经济年鉴》等,年份为2001—2019年。

2 指标及方法

2.1 评价指标选择

徐涵秋^[16]利用Landsat遥感影像提取绿色(NDVI)、湿度(Wet)、热度(LST)、干度(NDSI)4个重要指标,采用主成分分析法计算组合得到RSEI来综合反映生态环境质量状况。绿色表征地表植被覆盖及生物量丰度;湿度表征生态系统的水分含量;热度反映地表温度,人类活动造成的碳排放、城市热岛等,都会引起地表温度异常;干度表征生态系统土地退化状况,地表越“干化”,土地越裸露,生态质量越差^[17]。

1) 绿色。植被是生态系统的重要组成部分,是地球生物圈的物质基础。研究表明NDVI与植被生物量、叶面积指数、植被覆盖度密切相关^[24-25],这里同样用NDVI来表征生态系统绿色,公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} = \frac{b_2 - b_1}{b_2 + b_1}, \quad (1)$$

式中: ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别为近红外、红波段的反射率; b_2 和 b_1 分别为 MOD09A1 的第 2 波段和第 1 波段。

2) 湿度。徐涵秋将 Landsat 影像的缨帽变换湿度分量作为湿度指标, 缨帽变换多应用于 Landsat 和 IKONOS 等数据, MODIS 数据不能简单类比^[21]。这里用 SWCI 作为湿度指标, 该指数由 MODIS 对水分反射率变化敏感的第 6 和第 7 波段计算得到, 能有效提取植被冠层及地表的水分含量, 被广泛用于地表干旱研究^[26]。计算公式为:

$$SWCI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{SWIR2}} = \frac{b_6 - b_7}{b_6 + b_7}, \quad (2)$$

式中: ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 为短波红外的反射率; b_6 和 b_7 分别为 MOD09A1 的第 6 波段和第 7 波段。

3) 热度。将 MOD11A2 遥感数据的灰度值, 转换成常用的摄氏度来表征 LST^[21], 转换公式为:

$$LST = 0.02DN - 273.15, \quad (3)$$

$$BSI_M = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_{RED}) - (\rho_{NIR} + \rho_{BLUE})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{RED}) + (\rho_{NIR} + \rho_{BLUE})} = \frac{(b_6 + b_1) - (b_2 + b_3)}{(b_6 + b_1) + (b_2 + b_3)}, \quad (5)$$

$$NDSI_M = \frac{NDBI_M + BSI_M}{2}, \quad (6)$$

式中: ρ_{RED} , ρ_{NIR} , ρ_{BLUE} , ρ_{GREEN} 和 ρ_{SWIR1} 分别为红、近红外、蓝、绿波段和短波红外的反射率; b_1 , b_2 , b_3 , b_4 和 b_6 分别为 MOD09A1 的第 1, 2, 3, 4 波段和第 6 波段。这里调整了 $NDBI_M$ 分子的相减顺序, 取原值相反数(原 $NDBI_M < 0$ 为建设用地), 为了保证裸土指数和建筑指数对干度的同向影响, 即两者值越大, 干度指标值越大。

2.2 RSEI_M 模型构建

以单一指标形式, 综合以上 4 个分量指标的信息是构建 RSEI_M 的关键。主成分分析法是一种常用的多元统计方法, 通过多变量线性正交变换, 在保证原变量信息的同时, 减少变量个数。主成分分析能有效集成 4 个分量, 根据数据本身性质及对各个主成分的贡献度来确定分量指标的权重, 避免人为主观因素造成的偏差。在主成分分析前, 为了消除量纲的影响, 采用离差标准化方法将 4 个指标分量统一到 0~1 之间^[16-17]。

经过标准化处理后的 4 个分量指标就可以用来计算主成分了, 利用 ENVI 软件的主成分分析模块对 4 个指标影像进行分析, 计算公式如下:

$$RSEI_0 = 1 - PC1, \quad (7)$$

$$RSEI_M = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0_min}}{RSEI_{0_max} - RSEI_{0_min}}, \quad (8)$$

式中 DN 为地表温度产品影像的灰度值。

4) 干度。建设用地和裸土等造成地表的“干化”, 导致生态质量变差。徐涵秋^[16]基于 Landsat 数据计算的建筑指数和裸土指数构建了建筑-裸土指数(normalized difference built-up and soil index, NDSI), 其中建筑指数由土壤调节植被指数、修正归一化水体指数和归一化建筑指数(normalized difference building index, NDBI)衍生而来^[26-27], NDBI 基于近红外(第 2 波段)及短波红外(第 6 波段)计算得到。由于传感器及波谱设置差异, 吕颖等^[28]分析了 MODIS 光谱规律后, 发现 MODIS 的绿(第 4 波段)、红(第 1 波段)波段存在建设用地反射率低、其他地类反射率高的特点, 由此提出了新型的 MODIS 建筑指数 $NDBI_M$ 。结合 MODIS 裸土指数(bare soil index, BSI_M)^[29], 构建了基于 MODIS 的新型干度指标 $NDSI_M$, 公式为:

$$NDBI_M = \frac{\rho_{RED} - \rho_{GREEN}}{\rho_{RED} + \rho_{GREEN}} = \frac{b_1 - b_4}{b_1 + b_4}, \quad (4)$$

式中: $PC1$ 为 4 个指标的第一主成分; $RSEI_0$ 为像元 i 的初始生态指数; $RSEI_{0_max}$, $RSEI_{0_min}$ 为初始生态指数的最大、最小值; $RSEI_M$ 为标准化的 $RSEI_0$ 。

为了定量化分析不同时期的生态状况时空变化^[30], 将标准化的 $RSEI_M$ 以 0.2 为间距划分为 5 个等级, 分别表示生态质量状况差[0, 0.2]、较差(0.2, 0.4]、中等(0.4, 0.6]、良(0.6, 0.8]、优(0.8, 1.0], 并重新分等级赋值为 1~5。再利用差值变化检测, 对 2001—2019 年的生态质量状况进行动态监测, 按照等级差值将生态质量变化分为明显变差(-4 和 -3)、变差(-2 和 -1)、不变(0)、变好(1 和 2)、明显变好(3 和 4)这 5 种情况。

3 结果与分析

3.1 遥感生态指数参数分析

表 1 是研究区 4 个分量指标的主成分分析结果, 可以看出 4 个指标对第一主成分($PC1$)的贡献度相对稳定; 2001 年、2010 年及 2019 年, $PC1$ 的特征值贡献率分别为 89.31%、88.33% 和 82.81%, 均大于 80%, 说明 $PC1$ 已包含了 4 个指标的大部分信息; 且 $NDVI$, $SWCI$ 与 $NDSI_M$, LST 对生态质量的作用相反, 前 2 个指标起正向促进作用, 后两个起消极负向作用, 与实际情况相符, 故可以利用 $PC1$ 来构建综合生态指数。

表 1 指标主成分分析结果

Tab. 1 Principal component analysis results of the indicators

指标	2001 年				2010 年				2019 年			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
<i>LST</i>	-0.353	0.923	0.139	-0.063	-0.333	0.933	0.122	-0.059	-0.392	0.914	0.068	-0.085
<i>NDSI_M</i>	-0.543	-0.327	0.538	-0.556	-0.530	-0.300	0.605	-0.513	-0.512	-0.304	0.735	-0.325
<i>SWCI</i>	0.552	0.180	-0.158	-0.799	0.560	0.163	-0.110	-0.804	0.561	0.158	0.099	-0.806
<i>NDVI</i>	0.525	0.093	0.816	0.222	0.543	0.111	0.779	0.294	0.519	0.218	0.667	0.487
特征值	0.217	0.020	0.004	0.002	0.195	0.019	0.005	0.002	0.176	0.029	0.005	0.003
特征值贡献率/%	89.31	8.25	1.77	0.67	88.33	8.76	2.03	0.88	82.81	13.74	2.19	1.26

表 2 是各分量指标标准化值及 $RSEI_M$ 的统计值,结果表明,2001—2010 年, $RSEI_M$ 均值由 0.556 增加到 0.583,总体增加 4.93%,研究区生态质量有所提升,这与前人的研究成果基本一致^[31-32];2010—2019 年, $RSEI_M$ 下降到 0.527,总体下降 9.55%。2001—2019 年,研究区生态指数整体呈下降趋势,总体降低 5.22%。

表 2 各指标和 $RSEI_M$ 统计值Tab. 2 Statistics of each indicator and $RSEI_M$

指标	2001 年		2010 年		2019 年	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
<i>LST</i>	0.622	0.210	0.605	0.196	0.646	0.227
<i>NDSI_M</i>	0.439	0.260	0.424	0.242	0.466	0.227
<i>SWCI</i>	0.549	0.260	0.573	0.251	0.525	0.241
<i>NDVI</i>	0.607	0.251	0.635	0.246	0.618	0.227
$RSEI_M$	0.556	0.257	0.583	0.244	0.527	0.239

从各分量指标的变化来看,2001—2010 年, $SWCI$ 和 $NDVI$ 都有所增加,增加率分别为 4.37% 和 4.52%;2010—2019 年,下降率分别 8.38% 和 2.68%。从整个研究期看, $SWCI$ 总体降低了 4.37%, $NDVI$ 增加了 1.81%, $NDVI$ 的小幅增加,说明了近年来京津冀地区植被绿化建设初见成效^[33-34]。而对于 LST 和 $NDSI_M$,2001—2010 年,两者都降低了,下降率分别为 2.73% 和 3.42%;2010—2019 年,两者分别增加了 6.78% 和 9.91%。从整个研究期看, LST 总体增加了 3.86%, $NDSI_M$ 增加了 6.15%。

结合 $RSEI_M$ 的变化来分析,2001—2010 年,对生态质量起正向促进作用的 $SWCI$ 和 $NDVI$ 增加,起负向作用的 LST 和 $NDSI_M$ 下降,因此 $RSEI_M$ 升高,生态质量好转;而 2010—2019 年, $SWCI$ 和 $NDVI$ 均下降, LST 和 $NDSI_M$ 均上升,尤其是表征建设用地的裸土的 $NDSI_M$ 增加明显,这与近年来城市建设用地扩张,土地逐渐退化的现实情况相符^[23],因此 $RSEI_M$ 明显下降,生态质量变差。从整个研究期看,2001—2019 年,尽管起正向作用的 $NDVI$ 整体增加了 1.81%,但 $SWCI$ 总体降低,同时起消极作用的 LST 和 $NDSI_M$ 也增加了(3 者平均变化幅度为 4.79%), $NDVI$ 的增幅不足以抵消其他 3 个指标对生态质量的负作用,因此 $RSEI_M$ 整体呈下降趋势。以上分析说明,构建的 $RSEI_M$ 与各分量指标的变化一致,进一步说明 $RSEI_M$ 具有较好的综合代表性。

还可从 $RSEI_M$ 与各指标之间的相关性来分析其对生态质量的综合代表性,表 3 是各指标自身之间及 $RSEI$ 与各指标的相关系数表。由表 3 可以看出,4 个分量指标中平均相关度最高的是 $SWCI$,在 2001 年达到 0.879,3 年平均值为 0.858。而 $RSEI_M$ 与 4 个分量指标的 3 个年份的相关度均大于 0.9,3 a 平均值为 0.916,比最高的 $SWCI$ 高出了 6.76%,比 4 个指标的平均值(0.793)高出了 15.55%。这说明构建的 $RSEI_M$ 不仅集中了各分量指标的信息,还比任一指标更具代表性,更能综合表达区域生态质量状况。

表 3 各指标和 $RSEI_M$ 相关系数统计表Tab. 3 Statistical results of correlation coefficient between each indicator and $RSEI_M$

指标	2001 年					2010 年					2019 年				
	<i>LST</i>	<i>NDSI_M</i>	<i>SWCI</i>	<i>NDVI</i>	$RSEI_M$	<i>LST</i>	<i>NDSI_M</i>	<i>SWCI</i>	<i>NDVI</i>	$RSEI_M$	<i>LST</i>	<i>NDSI_M</i>	<i>SWCI</i>	<i>NDVI</i>	$RSEI_M$
<i>LST</i>	1.000				-0.779	1.000				-0.745	1.000				-0.722
<i>NDSI_M</i>	0.656	1.000			-0.971	0.618	1.000			-0.966	0.533	1.000			-0.945
<i>SWCI</i>	-0.711	-0.970	1.000		0.987	-0.678	-0.959	1.000		0.986	-0.627	-0.931	1.000		0.979
<i>NDVI</i>	-0.721	-0.930	0.954	1.000	0.975	-0.680	-0.921	0.952	1.000	0.974	-0.580	-0.909	0.943	1.000	0.959
平均相关度 ^①	0.696	0.852	0.879	0.868	0.928	0.658	0.833	0.863	0.851	0.918	0.580	0.791	0.834	0.811	0.901
3 a 均值	$LST = 0.645, NDSI_M = 0.825, SWCI = 0.858, NDVI = 0.843, RSEI_M = 0.916$														

①平均相关度是某一指标与其他指标相关系数绝对值的平均值。

3.2 京津冀地区生态质量时空变化

3.2.1 生态质量空间分布

图1是2001—2019年研究区 $RSEI_M$ 的空间分布,由图1可以看出,研究区生态质量优良区域集中在北部燕山—西部太行山区沿线,生态质量差和较差区域主要分布在冀西北生态脆弱区,京津唐、冀中南等城市化地区生态质量等级较低,环渤海滨海区由于植被覆盖度低,土地裸露,生态质量也较差。2001年,冀西北山间盆地、坝上高原等地分布有大范围的生态质量差和较差区域,北京、天津及河北各市中心城区生态质量也较差,另外沧州东部滨海区由于气候、水文及人为不合理开发利用等多方面因

素,土地盐碱化严重,生态质量较差^[35](图1(a))。2010年,冀西北生态质量明显改善,差和较差区域明显减少,中等区域逐渐扩大;沧州东部滨海区生态质量显著改善,差和较差等级大范围减少;北京、天津及河北各市如石家庄、保定、唐山等城市中心区,差和较差等级区域向外扩张明显(图1(b))。到2019年,冀西北生态质量持续改善,北京、天津生态质量差和较差的区域继续向远郊分散扩大,同时河北各市城镇化地区,尤其是冀中南石家庄、邯郸、邢台等地,生态质量差和较差的区域逐渐扩大(图1(c))。

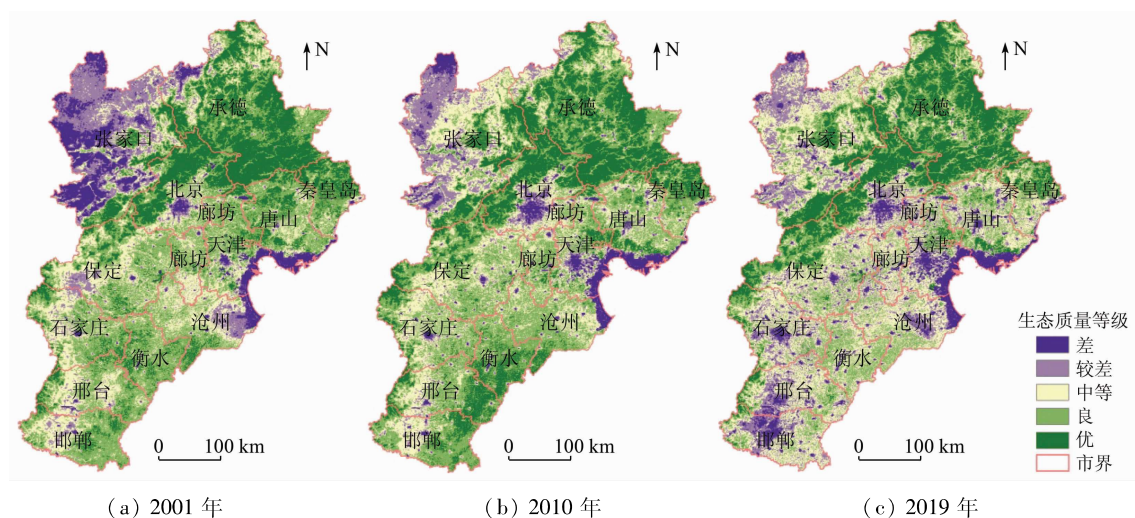


图1 研究区 $RSEI_M$ 空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of $RSEI_M$ in the study area

从生态质量各等级的面积和占比来看(图2),2001年及2010年,研究区生态质量占比最高的等级为良,占比分别为36.54%和38.20%,2019年生态质量占比最高的等级为中等(32.04%),等级为良的占比下降到25.77%。2001年、2010年、2019年,生态质量等级为中等及以上的占比分别为80.38%、85.75%、76.83%,差和较差的占比总和分别为19.62%、14.25%、23.17%,生态质量中等及以上的比重先增加后降低,差和较差的比重先减少后增加,研究区生态质量总体降低。2001—2019年,生态质量等级为差的占比从7.71%减少到6.69%,较差的占比由11.91%增加到16.49%,最差的等级向较差等级转移。这说明对于局部生态脆弱区,如坝上荒漠区,由于植树造林、退耕还林还草等一系列生态保护措施的实施,植被得以恢复,土地安全状况变好,生态质量趋于好转^[36-37]。但从整个研究区来看,较差等级增加的比重大于差等的减少,研究区生态质量总体仍呈下降趋势。2001—2019年,生态质量等级为中等的比重持续增加,良和优的等级比重整体下降,整个研究区的生态质量等级重

心逐渐由良、优等级向中等转移。总体而言,生态质量处于退化趋势,这与前文对 $RSEI_M$ 的分析结果一致(表2)。

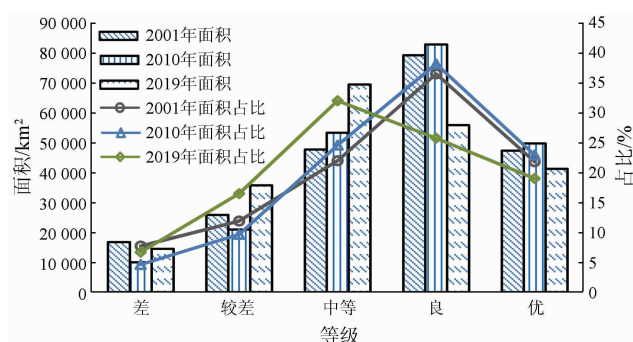


图2 2001—2019年研究区各等级生态质量面积和占比

Fig. 2 Area and proportion of ecological quality of each grade in the study area from 2001 to 2019

3.2.2 生态质量动态变化

按照等级差值,我们对研究区的生态质量变化进行了检测。从空间分布上来看(图3),2001—2010年,研究区生态质量改善区主要在冀西北及冀东南,呈2条带状分布,其中张家口地区生态质量改

善尤为明显。冀中南至京津唐地区,生态质量逐渐退化,东北部承德、秦皇岛等地生态质量基本不变(图 3(a))。2010—2019 年,生态改善区范围减小,主要分布在冀西北的张家口、承德北部及保定西部等;冀东及东南平原大部,生态质量均呈退化态势(图 3(b))。综合来看,2001—2019 年,研究区生态

质量总体呈现出西北改善,东南退化的空间格局,改善区域集中分布在冀西北的张家口、承德北部、保定西部及秦皇岛、沧州沿海地区,生态退化区主要分布在冀东南及京津唐等经济快速发展地区(图 3(c))。

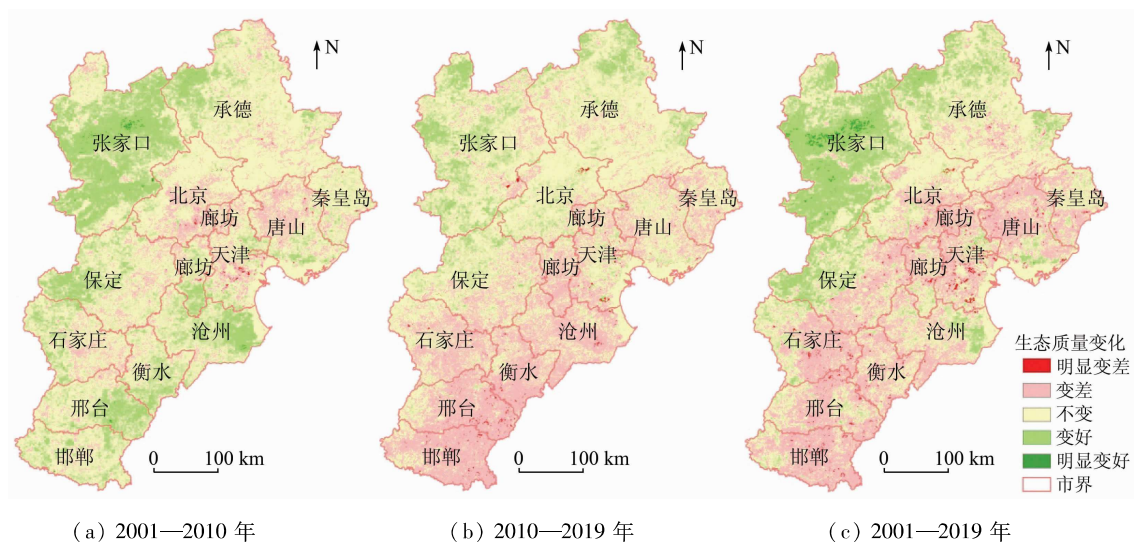


图 3 研究区 $RSEI_M$ 变化空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of $RSEI_M$ change in the study area

表 4 分阶段对研究区的生态质量等级变化进行了统计,2001—2010 年,研究区生态质量提升的面积为 5.57 万 km^2 ,占整个研究总面积的 25.66%;生态质量等级下降的面积为 3.31 万 km^2 ,占比为 15.23%,等级提升的面积及比重远大于下降的面积及比重,说明研究区生态质量明显改善。2010—2019 年,仅有不到 10% 的区域生态质量转好,35.51% 的区

域生态质量转差,等级不变的比重也由 59.11% 下降到 54.88%,说明研究区生态质量逐渐退化。研究期间,研究区生态质量呈先改善后退化的变化特征。整体而言,2001—2019 年生态质量转好区域占比(20.18%)小于转差区域占比(35.69%),生态质量总体呈下降趋势。

表 4 2001—2019 年研究区生态质量变化面积和占比

Tab. 4 Area and proportion of ecological quality change in the study area from 2001 to 2019

变化类别	极差	2001—2010 年		2010—2019 年		2001—2019 年	
		面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%
明显变差	-4, -3	225.72	0.10	712.40	0.33	1502.91	0.69
变差	-2, -1	32 838.31	15.13	76 358.30	35.18	75 967.23	35.00
不变	0	128 285.30	59.11	119 116.43	54.88	95 766.28	44.13
变好	1, 2	55 369.04	25.51	20 841.91	9.60	42 920.70	19.78
明显变好	3, 4	314.73	0.15	4.06	0.00	875.98	0.40

从各市的生态质量变化来看,承德、秦皇岛、北京、衡水、保定的 $RSEI_M$ 均值较高,生态质量较好;张家口、天津、沧州的 $RSEI_M$ 均值较低,生态质量较差(图 4)。研究期间,承德的生态质量持续最优,2001 年、2010 年、2019 年的 $RSEI_M$ 始终高于其他城市,3 个年份的 $RSEI_M$ 均值为 0.774,比整个研究区的平均值(0.555)高出了 39.46%,其次为秦皇岛、北京、衡水、保定、邯郸、石家庄,均高于研究区 3 个年份的 $RSEI_M$ 均值。张家口的 $RSEI_M$ 均值最低,但研究期间持续增长,从 2001 年的 0.358 增加到 2019

年的 0.531,增幅达 48.28%,年均增长 2.21%,其中 2001—2010 年增长最快,年均增长率达 3.82%,说明 2001—2019 年张家口的生态环境持续改善,生态质量显著提高。承德的 $RSEI_M$ 也呈缓慢增长,从 2001 年的 0.769 增长至 2019 年的 0.779,年均增长 0.07%。北京、天津、石家庄、唐山、秦皇岛、廊坊的 $RSEI_M$ 持续下降,其中天津下降最为明显,2001—2019 年从 0.559 下降至 0.419,总体降低了 25.08%,其次为廊坊、唐山,总体降幅均超过 20%。邯郸、邢台、保定、沧州和衡水的 $RSEI_M$ 均呈现出先上升后下

降的变化特征,其中,2001—2010年沧州的 $RSEI_M$ 增长最显著,从0.523增长至0.596,增幅为14.03%;2010—2019年,邯郸的 $RSEI_M$ 下降最明显,从0.665

下降至0.446,降幅为32.87%,其次为邢台、衡水、沧州,降幅均超过20%。

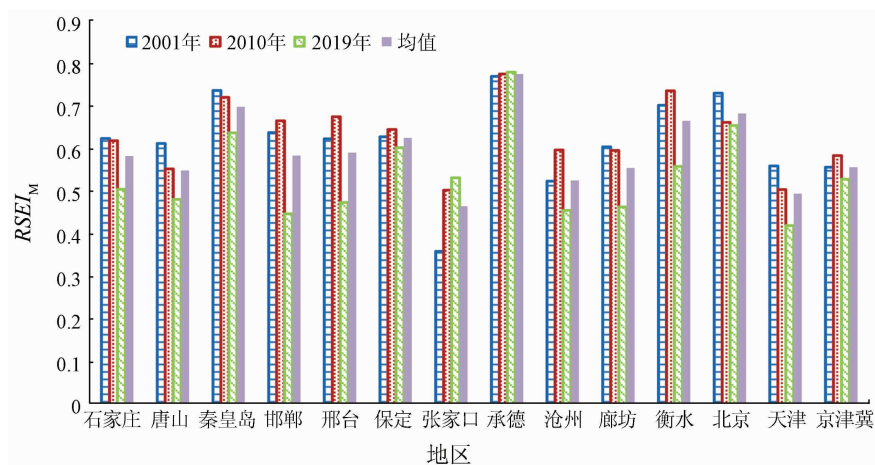


图4 2001—2019年研究区各市 $RSEI_M$ 统计

Fig. 4 Statistics of $RSEI_M$ of cities in the study area from 2001 to 2019

3.3 生态质量变化的驱动因素

大量研究表明,生态环境的变化往往是由于自然和人为等多种因素驱动^[38-39]。本文对京津冀地区生态质量变化的驱动因素进行了分析,发现温度、湿度等自然因素、人类生产生活及生态保护政策等

人为因素,是驱动研究区生态环境变化的主要因素。

3.3.1 自然因素

对研究区25个气象站点2001—2019年的年均气温、年均地温、降水量和相对湿度进行统计,讨论研究区的温度和湿度变化情况,如图5所示。

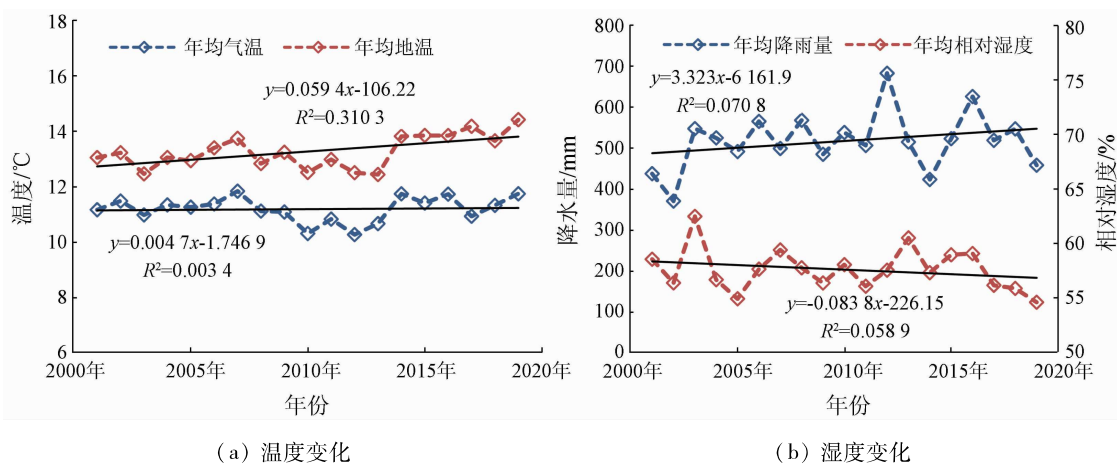


图5 2001—2019年气候因子变化趋势

Fig. 5 Change trend of climate factors from 2001 to 2019

结果表明,2001—2019年,研究区年均气温和年均地温均呈上升趋势,这与前面2.2部分遥感热度指标的变化相一致(表2)。年均气温从2001年的11.16℃上升到2019年的11.74℃,平均每年上升0.032℃;年均地温从2001年的13.03℃上升到2019年的14.40℃,平均每年上升0.076℃,且年均地温的回归分析结果具有显著的统计学意义($R^2=0.3103$, $P<0.05$)(图5(a))。2001—2019年,研究区年均降水量呈小幅度波动上升趋势,相对湿度呈轻微下降趋势,但两者趋势并不显著。2001—2019年,年均降水量从437.47 mm增加到458.20 mm,平均每年增加1.15 mm;相对湿度由

58.57%下降到54.63%,在2003年达到最高值62.50%,自2016年后持续下降(图5(b))。

总的来看,降水量的略微增加有利于区域植被生长和湿度增加,对区域综合生态质量有正向促进作用;但温度的大幅增加及相对湿度的下降,这些不利因素会导致区域生态质量的下降。因此,温度、降水量、相对湿度等气候因素的变化在一定程度上导致了研究区生态质量的退化。

3.3.2 人为因素

1) 社会经济因素。人口激增、城市扩张、经济发展等都会对生态环境造成压力,导致生态质量退化。本文统计了2001—2019年以来,京津冀地区城

市群的耕地面积(km^2)、建成区面积(km^2)、人口密度($\text{人}/\text{km}^2$)、国内生产总值(gross domestic product, GDP)密度($\text{万元}/\text{km}^2$)及人均 GDP($\text{元}/\text{人}$)的变化情况,以此来分析社会经济和人类活动等人为因素对区域生态环境质量造成的影响(图 6)。GDP 密度、人均 GDP 及人口密度代表经济发展程度,耕地面积和建成区面积代表人类土地利用对生态环境的干扰程度。由图 6 可以看出,研究区社会经济发展迅速,GDP 密度及人均 GDP 指标增长显著。其中北京、天津的 GDP 增速明显,两个地区的 GDP 密度平

均每年增长 15.45%,比整个研究区的均值(13.59%)高了 1.86 百分点(图 6(a))。同时,北京、天津人口密度增长也最快,两个地区的人口密度平均年增长率(3.83%),是研究区均值(1.61%)的 2.38 倍(图 6(b))。随着京津冀协同发展的不断推进,河北各市的 GDP 密度和人均 GDP 增速明显,其中沧州、唐山、廊坊等增速较快(图 6(a));但从人口密度来看,承德人口密度基本不变,张家口人口呈负增长,其他河北各市的人口密度均呈现不同程度的增长(图 6(b))。

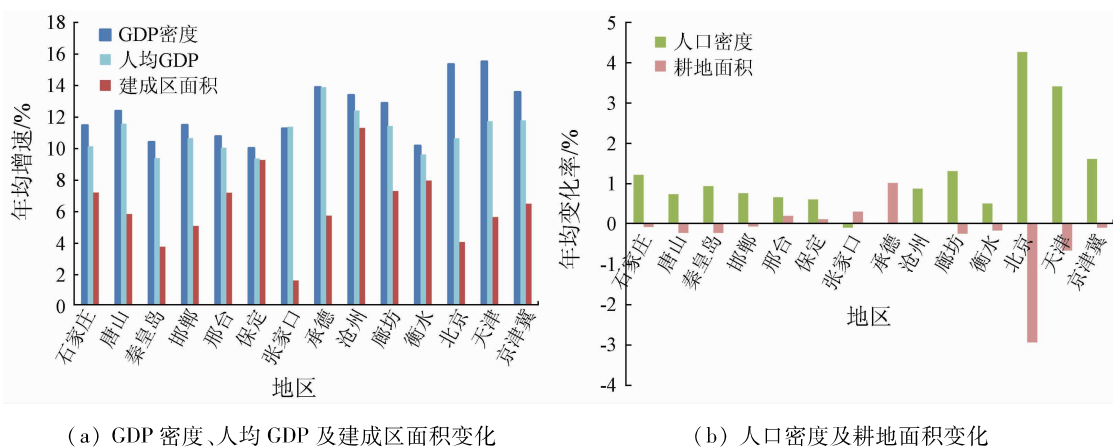


图 6 2001—2019 年研究区各市社会经济因素变化对比

Fig. 6 Comparison of social and economic factors of cities in the study area from 2001 to 2019

研究期间,北京、天津的耕地面积急剧减少,年均下降率分别为 2.93% 和 0.66%,比研究区均值(0.09%)分别高了 2.84 百分点和 0.57 百分点。承德、张家口、保定及邢台等地受耕地保护、基本农田等政策影响,耕地面积少量增加,河北其他各市的耕地面积均减少,年均下降率为 0.14%,其中廊坊、唐山、秦皇岛耕地面积明显减少(图 6(b))。从建成区面积变化来看,研究区各市建成区面积均明显增加,北京、天津的建成区面积年均增长率分别为 4.05% 和 5.64%,河北各市的建成区面积平均年增长率为 6.56%,比研究区均值(6.49%)高 0.7 百分点,其中沧州、保定、衡水增加明显(图 6(a))。以上结果表明,京津冀地区城市化进程中,耕地资源快速减少,建设用地急剧扩张,人类活动对生态环境的干扰程度不断加大。

京津唐、冀中南工业化城镇化地区,人口稠密,社会经济快速发展,城市化迅速扩张,生态质量明显退化,说明社会经济活动增强、人类干扰强度增大等因素是导致生态质量退化的重要驱动因素。

2) 政策因素。随着国家“主体功能区战略”、“京津冀生态环境支撑区”、《京津冀协同发展规划纲要》、《京津冀协同发展生态环境保护规划》等政策的实施,坝上高原山地区,燕山—太行山山区作为

京津冀地区重要的生态功能区和生态屏障,大力实施生态建设工程,大规模开展国土绿化及生态修复工作,生态质量得到有效改善和恢复。冀中平原、燕山山前平原、冀中南平原等地区作为国家及省级重点开发区域,是京津冀地区人口、经济和城市的主要聚集地,城镇化、工业化发展迅速,生态空间被大量挤占,出现局部生态退化现象。

4 讨论

原有的 RSEI 基于 Landsat 数据,被广泛应用于市域、县域或专题区的生态环境质量监测^[30],对于省级、国家级等区域大尺度的生态质量监测应用较少。本研究利用空间覆盖范围更广的 MODIS 数据,参考徐涵秋^[16-17]的 RSEI,通过分析 MODIS 波段光谱特征规律,选择对湿度更敏感的 SWCI 来表征湿度,利用对建设用地更敏感的红光、绿光波段构建 MODIS 建筑指数 NDBI_M,优化得到干度指标 NDSI_M,构建了基于 MODIS 的表征区域综合生态质量的 RSEI_M。表 5 对比了本文改进的湿度 SWCI、干度 NDSI_M和原湿度 Wet^[40]、干度 NDSI 与 RSEI_M、绿度 NDVI、热度 LST 之间的相关性,3 个年份中,改进后的干度 NDSI_M、湿度 SWCI,相比原干度、湿度指标,

与单指标 LST,NDVI 以及综合指数 $RSEI_M$ 的相关性都高,说明改进后的干度、湿度指标更能表征生态系统各因子之间的相互作用关系,得到的综合生态指数代表性更强。

表5 改进前后的干度、湿度指标与 $RSEI_M$ 、热度、绿度指标的相关性
Tab.5 Correlation coefficient between dryness, wetness before and after improvement and remote sensing ecological index, heat and greenness

指标		2001 年			2010 年			2019 年		
		$RSEI_M$	LST	NDVI	$RSEI_M$	LST	NDVI	$RSEI_M$	LST	NDVI
干度	$NDSI_M$	-0.971	0.656	-0.930	-0.966	0.618	-0.921	-0.945	0.533	-0.909
	$NDSI$	-0.916	0.561	-0.876	-0.908	0.523	-0.864	-0.857	0.403	-0.850
湿度	SWCI	0.987	-0.711	0.954	0.986	-0.678	0.952	0.979	-0.627	0.943
	Wet	0.775	-0.549	0.685	0.736	-0.486	0.651	0.620	-0.307	0.559

常用的指标耦合方法是将各指标加权求和,当多个指标对生态系统质量起作用时,要确定哪个指标对全局变化起主要作用较为困难,且具有较大不确定性^[16,30]。以 $RSEI_M$ 为因变量,以 $NDSI_M$,SWCI,

$RSEI_{M_2001} = 0.307\ 1SWCI + 0.302\ 5NDVI - 0.184\ 6LST - 0.293\ 6NDSI_M + 0.446\ 9$ ($R^2 = 0.994$), (9)

$RSEI_{M_2010} = 0.317\ 1SWCI + 0.313\ 0NDVI - 0.171\ 5LST - 0.278\ 2NDSI_M + 0.424\ 5$ ($R^2 = 0.993$), (10)

$RSEI_{M_2019} = 0.330\ 6SWCI + 0.307\ 9NDVI - 0.217\ 1LST - 0.279\ 1NDSI_M + 0.433\ 5$ ($R^2 = 0.992$)。 (11)

从3个年份各指标回归系数的绝对值来看,4个指标对生态指数贡献度最大的是SWCI,然后依次为NDVI,NDSI_M和LST。SWCI和NDVI系数为正,说明对生态起正向作用,NDSI_M和LST系数为负,说明对生态起负向作用,这与表1的分析一致。徐涵秋^[16]利用该方法发现对福州市生态指数贡献度依次为NDVI,NDSI,LST和Wet。说明主成分分析能依据数据本身性质客观反映各地生态差异,避免了人为主观因素的影响,评价指标赋权科学合理,提高了区域生态质量评价的准确性和客观性。

5 结论

本文基于MODIS数据对遥感生态指数进行了改进,推广了其应用范围和尺度;根据MODIS数据特性,对湿度和干度指标进行了优化;直接利用时空连续的MODIS数据及产品,打破了数据源的时空限制;采用主成分分析法,避免了人为设定权重的主观差异。本文为基于遥感的区域大范围生态质量综合评价及其时空变化规律探究,提供了一种新的评价角度,主要结论如下:

1)京津冀地区总体生态质量中等,2001年、2010年和2019年生态等级在中等及以上的占比分别为80.38%,85.75%和76.83%。生态质量区域差异明显,北部燕山—西部太行山地区生态质量优良,冀西北张家口及冀东南城市中心区生态质量较差。行政区划上,承德、秦皇岛、北京、保定等地的生态质量较好,张家口、天津生态质量较差。

NDVI,LST这4个分量指标为自变量,建立了研究区3个年份的多元回归模型(均通过1%的显著性检验),分别为:

2)2000—2019年,研究区生态质量整体呈下降趋势,综合遥感生态指数从2001年的0.556增长到2010年的0.583,2019年又下降到0.527,总体降低5.22%。研究期间,生态质量转好、不变和转差的面积占比分别为20.18%,44.13%,35.69%,生态退化的面积明显大于改善面积。空间上大体表现为西北改善、东南退化的格局,行政区划上,张家口、承德生态质量提升,邯郸、邢台、衡水、廊坊、天津生态质量下降。

3)气候变化、社会经济和生态保护政策等人为因素共同导致了研究区的生态质量变化。降水量的增加促进了研究区的植被生长,温度升高和相对湿度降低则抑制了生态质量转好。张家口由于人为生态保护政策加强,生态质量明显改善;冀东南由于人口增加、经济发展、城市扩张等社会经济因素,生态质量发生退化。

参考文献(References):

[1] Wu J. Urban ecology and sustainability: The state - of - the - science and future directions[J]. Landscape and Urban Planning, 2014,125:209 - 221.

[2] 樊杰,王亚飞. 40年来中国经济地理格局变化及新时代区域协调发展[J]. 经济地理,2019,39(1):1 - 7.

Fan J, Wang Y F. Pattern evolution of China's economic geography in the past 40 years and regional coordinated development in the new era[J]. Economic Geography, 2019,39(1):1 - 7.

[3] 颜梅春,王元超. 区域生态环境质量评价研究进展与展望[J]. 生态环境学报,2012,21(10):1781 - 1788.

Yan M C, Wang Y C. Advances in the evaluation of ecological environmental quality [J]. Ecology and Environmental Sciences,

- 2012,21(10):1781–1788.
- [4] 梁龙武,王振波,方创琳,等.京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局[J].生态学报,2019,39(4):1212–1225.
Liang L W, Wang Z B, Fang C L, et al. Spatiotemporal differentiation and coordinated development pattern of urbanization and the ecological environment of the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1212–1225.
 - [5] 饶丽,周利军,徐聪,等.生态环境质量评价的内涵、方法和实践[J].亚热带水土保持,2020,32(3):37–41,54.
Rao L, Zhou L J, Xu C, et al. Connotation, method and practice of the quality assessment on eco–environment[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2020, 32(3): 37–41, 54.
 - [6] 马骏,李昌晓,魏虹,等.三峡库区生态脆弱性评价[J].生态学报,2015,35(21):7117–7129.
Ma J, Li C X, Wei H, et al. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7117–7129.
 - [7] 王毅,谢蓉蓉,王菲凤,等.基于Delphi–PSR模型的祁连山国家级自然保护区生态安全评价[J].山地学报,2019,37(3):328–336.
Wang Y, Xie R R, Wang F F, et al. Evaluation on eco–security of Qilian Mountain National Nature Reserve based on Delphi–PSR model[J]. Mountain Research, 2019, 37(3): 328–336.
 - [8] Liu G, Wang J, Li S, et al. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in a lake watershed based on RS and GIS technology[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 28(3): 1785–1798.
 - [9] He F, Gu L, Wang T, et al. The synthetic geo–ecological environmental evaluation of a coastal coal–mining city using spatiotemporal big data: A case study in Longkou, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 854–866.
 - [10] 周文英,何彬彬.四川省若尔盖县生态环境质量评价[J].地球信息科学,2014,16(2):314–319.
Zhou W Y, He B B. Eco–environmental quality assessment of Ruogai County in Sichuan Province based on multi–sources remote sensing data[J]. Journal of Geo–information Science, 2014, 16(2): 314–319.
 - [11] Wang X, Cao Y, Zhong X, et al. A new method of regional eco–environmental quality assessment and its application[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(5): 1393–1401.
 - [12] Liu Y, Yue W, Fan P, et al. Assessing the urban environmental quality of mountainous cities: A case study in Chongqing, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 81: 132–145.
 - [13] 潘洋,巩合德,董李勤,等.基于层次分析法的广西金秀地区生态环境质量综合评价[J].西南林业大学学报(自然科学版),2017,37(3):74–80.
Pan Y, Gong H D, Dong L Q, et al. Comprehensive assessment of ecological environment quality in Jinxiu area based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science Edition), 2017, 37(3): 74–80.
 - [14] 赵恒谦,贾梁,尹政然,等.基于多源遥感数据的北京市通州区土地利用/覆盖与生态环境变化监测研究[J].地理与地理信息科学,2019,35(1):38–43.
Zhao H Q, Jia L, Yin Z R, et al. Dynamic monitoring of land use and ecological environment based on multiple remote sensing data: A case study of Tongzhou District, Beijing[J]. Geography and Geo–information Science, 2019, 35(1): 38–43.
 - [15] Wang S, Liu J, Yang C. Eco–environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China[J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 171–182.
 - [16] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853–7862.
Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853–7862.
 - [17] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889–897.
Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889–897.
 - [18] Yue H, Liu Y, Li Y, et al. Eco–environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index[J]. IEEE Access, 2019, 7: 51295–51311.
 - [19] 茹克亚·萨吾提,阿不都艾尼·阿不里,李虎,等.基于遥感生态指数模型的阜康市生态环境动态变化监测与评价[J].水土保持研究,2020,27(1):283–297.
Rukeya S, Abuduheni A, Li H, et al. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Fukang City based on RSEI model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 283–297.
 - [20] 方灿莹,胡秀娟,徐涵秋,等.不同城市规划的生态质量差异对比研究[J].地球信息科学,2017,19(8):1097–1107.
Fang C Y, Hu X J, Xu H Q, et al. Comparison of the ecological quality between different urban plans[J]. Journal of Geo–Information Science, 2017, 19(8): 1097–1107.
 - [21] 吴宜进,赵行双,奚悦,等.基于MODIS的2006—2016年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J].地理学报,2019,74(7):1438–1449.
Wu Y J, Zhao X S, Xi Y, et al. Comprehensive evaluation and spatial–temporal changes of eco–environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006–2016[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1438–1449.
 - [22] Xu H, Wang Y, Guan H, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis[J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2345.
 - [23] 李孝永,匡文慧.京津冀1980—2015年城市土地利用变化时空轨迹及未来情景模拟[J].经济地理,2019,39(3):187–194.
Li X Y, Kuang W H. Spatio–temporal trajectories of urban land use change during 1980–2015 and future scenario simulation in Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2019, 39(3): 187–194.
 - [24] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3): 241–252.
 - [25] Feng L, Jia Z, Li Q, et al. Zhang Z. Spatiotemporal change of sparse vegetation coverage in Northern China[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2019, 47(2): 359–366.
 - [26] 郭焱,于红博,马梓策,等.基于MODIS的土壤含水量时空变化及干旱化程度分析[J].水土保持研究,2019,26(4):185–189.

- Guo T, Yu H B, Ma Z C, et al. Analysis of spatial and temporal variations of soil moisture content and drought degree based on MODIS [J]. Research of Soil and Water conservation, 2019, 26(4): 185–189.
- [27] 徐涵秋. 一种基于指数的新型遥感建筑用地及其生态环境意义[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 301–308.
- Xu H Q. A new index – based built – up index (IBI) and its eco – environmental significance [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(3): 301–308.
- [28] 吕颖, 刘慧平, 刘锦绣. 基于中分辨率成像光谱仪数据的建筑指数研究[J]. 测绘科学, 2015, 40(5): 44–48, 70.
- Lyu Y, Liu H P, Liu J X. Study on built – up index based on MODIS data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(5): 44–48, 70.
- [29] 李霞, 徐涵秋, 李晶, 等. 基于NDSI和NDISI指数的SPOT – 5影像裸土信息提取[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(1): 117–123.
- Li X, Xu H Q, Li J, et al. Extraction of bare soil features from SPOT – 5 imagery based on NDSI and NDISI [J]. Journal of Geo – Information Science, 2016, 18(1): 117–123.
- [30] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 277–284.
- Yang J Y, Wu T, Pan X Y, et al. Ecological quality assessment of Xiong'an New Area based on remote sensing ecological index [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 277–284.
- [31] 王静, 周伟奇, 许开鹏, 等. 京津冀地区的生态质量定量评价[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2667–2676.
- Wang J, Zhou W Q, Xu K P, et al. Quantitative assessment of ecological quality in Beijing – Tianjin – Hebei urban megaregion, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2667–2676.
- [32] 王伟, 王秀兰, 冯仲科, 等. 基于RS与GIS的环首都经济圈生态环境质量动态评价[J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(2): 257–262.
- Wang W, Wang X L, Feng Z K, et al. Dynamic evaluation of eco – environmental quality in the capital economic circle based on RS and GIS [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2015, 42(2): 257–262.
- [33] 王巍巍, 徐秋阳, 莫罹. 京津冀城镇群建成区生态环境影响评价[J]. 环境生态学, 2020, 2(5): 27–34.
- Wang W W, Xu Q Y, Mo L. Eco – environment impact assessment of built – up area of Beijing – Tianjin – Hebei urban agglomeration [J]. Environment Ecology, 2020, 2(5): 27–34.
- [34] 徐勇, 黄雯婷, 靖娟利, 等. 京津冀地区植被NDVI动态变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 319–327.
- Xu Y, Huang W T, Jing J L, et al. Dynamic variation of vegetation cover and its relation with climate variables in Beijing – Tianjin – Hebei region [J]. Bulletin of Soil and Water conservation, 2020, 40(5): 319–327.
- [35] 陈景, 韩素卿, 肖唯文. 沧州滨海区盐碱地时空变化及治理研究[J]. 中国国土资源经济, 2018, (11): 38–43.
- Chen J, Han S Q, Xiao W W. Study on spatio – temporal changes and rehabilitation of saline – alkali land in the coastal area of Cangzhou [J]. Natural Resource Economics of China, 2018, (11): 38–43.
- [36] 许月卿, 赵菲菲, 孙丕苓. 生态脆弱区土地生态安全动态评价——以河北省张家口市为例[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 232–238.
- Xu Y Q, Zhao F F, Sun P L. Evaluation of land ecological security in ecological fragile area: A case study of Zhangjiakou City, Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 232–238.
- [37] 黄麟, 吴丹, 孙朝阳. 基于规划目标的京津风沙源治理区生态保护与修复效应[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1923–1932.
- Huang L, Wu D, Sun C Y. The ecological effects of ecosystem conservation and restoration in Beijing – Tianjin sand source regions based on the planning objects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1923–1932.
- [38] 周沙, 黄跃飞, 王光谦. 黑河流域中游地区生态环境变化特征及驱动力[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 766–773.
- Zhou S, Huang Y F, Wang G Q. Changes in the ecological environment and their determining factors in the middle Heihe River Basin [J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 766–773.
- [39] 和春兰, 普军伟, 沈金祥. 2005—2018年澜沧江下游流域景观生态安全时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 219–227.
- He C L, Pu J W, Shen J X. Spatial – temporal changes and driving mechanisms of landscape ecological security in lower reaches of Lancang River during 2005—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 219–227.
- [40] Lobser S E, Cohen W B. MODIS tasseled cap: Land cover characteristics expressed through transformed MODIS data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(22): 5079–5101.

MODIS – based comprehensive assessment and spatial – temporal change monitoring of ecological quality in Beijing – Tianjin – Hebei region

ZUO Lu^{1,2}, SUN Leigang^{1,2,3}, LU Junjing^{1,2}, XU Quanhong^{1,2}, LIU Jianfeng^{1,2}, MA Xiaoqian^{1,2}

(1. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050021, China;

3. Julu Institute of Applied Technology, Xingtai 055250, China)

Abstract: Ecological quality assessment is an important prerequisite for guaranteeing the harmony and stability of the production and life of human beings and the ecological environment and for achieving the sustainable development of regional social economy. It has become a new trend to quickly, accurately, and objectively assess

the regional ecological quality using use remote sensing technology. This study used the MODIS data of the Beijing – Tianjin – Hebei region in 2001, 2010, and 2019 to extract four important indices, namely, NDVI (greenness), LSM (humidity), NDBSI (dryness), and LST (heat). Then, this study obtained the MODIS remote sensing ecological index ($RSEI_M$) using the principal component analysis method to conduct a comprehensive assessment and change monitoring of the ecological quality in the Beijing – Tianjin – Hebei region over the past 20 years. The results are as follows. ① The ecological quality of the Beijing – Tianjin – Hebei region shows distinct regional differences. The Yanshan Mountain in the north and the Taihang Mountain in the west have high ecological quality, while the Zhangjiakou area in the northwestern part of Hebei Province and the urban center in the southeastern part of Hebei Province suffer low ecological quality. ② In 2001, 2010, and 2019, the average $RSEI_M$ of the Beijing – Tianjin – Hebei region was 0.556, 0.583, and 0.527, respectively, with the overall ecological quality showing a downward trend. ③ From 2001 to 2019, the area with improved and degraded ecological quality in the Beijing – Tianjin – Hebei region accounted for 20.18% and 35.69% respectively, and the ecological quality in this region showed a pattern of improvement in the northwest and degradation in the southeast. The main reasons for the ecological improvement in the northwestern part of the region are the changes in water and heat conditions, such as an increase in precipitation and temperature, and a series of man – made protection measures. The reasons for ecological degradation in the southeastern part of the Beijing – Tianjin – Hebei region mainly include the rapid advancement of urbanization and the enhancement of social and economic activities. The comprehensive assessment of regional ecological quality can be effectively achieved based on MODIS data, thus providing a reference for the green and high – quality development of regional social economy.

Keywords: ecological quality; comprehensive evaluation; remote sensing monitoring; MODIS; spatial – temporal changes

(责任编辑: 张 仙)