

广东省“十二五”生态环境时空变化趋势及影响因素

刘花, 郭庆荣*, 刘朱婷

(广东省环境监测中心, 广东 广州 510308)

摘要: 基于 2011—2015 年 Landsat7、Landsat8 等卫星遥感影像, 结合土壤侵蚀面积、水资源量、降雨量、污染物排放量等统计数据, 按照《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015), 研究评价广东省“十二五”期间生态环境状况及其时空变化趋势, 并对其影响因素进行综合分析。结果表明, 广东省的生态环境状况总体为优, 各市生态环境状况均属优、良, 粤北生态环境状况整体最好; 广东省及各市生态环境状况稳中趋好, 但呈现温和地波动变化; 主要污染物排放量下降和水资源总量提高是促进生态环境状况改善的主要原因。

关键词: 遥感监测; 生态环境状况指数; 时空变化; 广东

中图分类号: X87

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2019)04-0010-06

Study on the Spatial-temporal Variations and Influence Factors of Ecosystem Status in Guangdong Province during the 12th Five-Year Plan Period

LIU Hua, GUO Qing-rong*, LIU Zhu-ting

(Guangdong Environmental Monitoring Center, Guangzhou, Guangdong 510308, China)

Abstract: Based on Landsat7, Landsat8 images and the statistical data of soil erosion area, water resources, rainfall and pollutant emissions in 2011—2015, the ecological environment quality and its spatial and temporal trends in Guangdong Province were evaluated during the 12th Five-Year Plan Period according to the “Technical Criterion for Ecosystem Status Evaluation” (HJ 192—2015). Moreover, the influencing factors were comprehensively explored. The results showed that the eco-environment quality of Guangdong Province was totally excellent, and each city was assessed as excellent or good. And what's more, the overall eco-environment quality of northern Guangdong was the best. Besides, the eco-environment quality of Guangdong Province and various cities were gradually improved and stable with mild fluctuations. The decline of major pollutant emissions and the increase of total water resources were the main reasons for improving the eco-environment quality.

Key words: Remote sensing monitoring; Ecological index; Spatial-temporal variations; Guangdong

生态监测作为一种系统地搜集地球自然资源信息的技术方法, 起始于 20 世纪 60 年代后期。我国的生态监测兴起于 70 年代, 至今已经开展了一系列的环境、资源和污染的调查与研究, 相继建立一批生态(环境)监测站、生态观测定位站, 对部分区域、省域乃至全国的生态环境进行了连续监测、调查和分析评价。根据不同的监测需求, 不同学者对生态监测内涵有着不同的理解, 结合环保部门生态保护的工作职责, 生态环境监测至少应该包括两部分, 一是监测生态环境质量; 二是监督对生态环境有影响的自然资源开发利用活动、重要生态环境建设和生态破坏恢复工作^[1-4]。文献[5]开展我国生态环境质量评价研究, 首次提出生态监测技术路线, 构建了区域生态环境质量评价指标体

系。近年来, 区域性的生态环境评价和生态调查日益受到重视, 调查和评价成果为环境管理和生态保护决策提供了越来越多的科技支撑^[6-11]。

“十二五”期间, 广东省经济保持较快发展, 同时生态环境质量初步呈现稳中趋好态势, 全省化学需氧量(COD)等 4 项主要污染物排放量持续下降, 超额完成国家减排任务。但珠三角的区域发展

收稿日期: 2019-04-01; 修订日期: 2019-04-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(八六三计划)基金资助项目(2014AA06A511); 广东省省级科技计划基金资助项目(2017B020216001)

作者简介: 刘花(1988—), 女, 工程师, 硕士, 从事生态环境遥感监测研究工作。

* 通讯作者: 郭庆荣 E-mail: 13609793463@139.com

空间面临瓶颈制约,资源能源约束趋紧,生态环境压力日益增大。现基于 2011—2015 年 Landsat7、Landsat8 等卫星遥感影像,结合土壤侵蚀面积、水资源量、降雨量、污染物排放量等统计数据,研究评价广东省“十二五”期间生态环境状况及其时空变化趋势,并对其影响因素进行综合分析。

1 研究区概况

广东省地处中国大陆最南部,陆地位于北纬 20°09′—25°31′,东经 109°45′—117°20′。自东至西依次与福建省、江西省、湖南省、广西壮族自治区接壤;西南端隔琼州海峡与海南省相望。受地壳运动、岩性、褶皱和断裂构造以及外力作用的综合影响,广东省地貌类型复杂多样,有山地、丘陵、台地和平原,其面积分别占全省土地总面积的 33.7%、24.9%、14.2% 和 21.7%,河流和湖泊等只占全省土地总面积的 5.5%。地势总体北高南低,北部多为山地和高丘陵,南部则为平原和台地。平原以珠江三角洲平原面积最大,潮汕平原次之。广东省属于东亚季风区,从北向南分别为中亚热带、南亚热带和热带气候,是全国光、热和水资源较丰富的地区,且雨热同季,降水主要集中在 4—9 月,年均气温 21.8℃,其分布呈南高北低;年均降水量为

1 789.3 mm,其分布不均,呈多中心分布。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

(1)土地利用/覆盖数据采用全国生态遥感监测土地利用/覆盖分类体系(见图 1),根据 2011—2015 年 Landsat7、Landsat8、资源一号 02C 星等遥感卫星影像通过目视解译得来,解译精度一级分类为 95%,二级分类为 90%;

(2)中分辨率成像光谱仪(MODIS)影像、水资源量、水土流失、降雨量以及 COD、氨氮(NH₃-N)、二氧化硫(SO₂)、烟(粉)尘、氮氧化物(NO_x)、固体废物排放量等污染物排放数据。其中 MODIS 影像来源于美国地质调查局官网(<https://www.usgs.gov/>),水资源量和水土流失数据来源于广东省水利厅;降雨量来源于广东省气象局;COD、NH₃-N、SO₂、烟(粉)尘、NO_x、固体废物排放量等污染物排放数据来源于原广东省环境保护厅。以上数据覆盖时段均为 2011—2015 年。MODIS 影像用于计算植被覆盖指数,水资源量用于计算水网密度指数,水土流失数据用于计算土地胁迫指数,降雨量及污染物排放数据用于计算污染负荷指数。

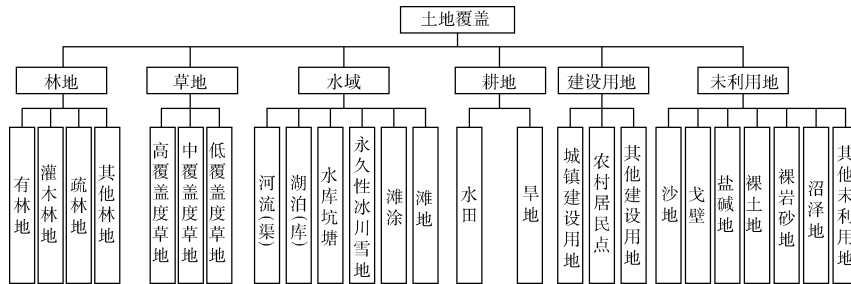


图 1 全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系

2.2 评价方法

按《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015)^[12],评价指标包括生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地胁迫指数和污染负荷指数,通过分指数加权计算得到一个综合指数即生态环境状况指数(EI)。基础评价单元为县级行政区域,市级的值通过县级面积加权计算得到,省级的值通过市级面积加权计算得到。现针对省级和市

级评价单元进行生态环境状况评价分析,市级评价单元包含广东省 21 个地级以上市(以下简称“地市”),分别为:广州市、深圳市、珠海市、汕头市、佛山市、韶关市、河源市、梅州市、惠州市、汕尾市、东莞市、中山市、江门市、阳江市、湛江市、茂名市、肇庆市、清远市、潮州市、揭阳市、云浮市,以及顺德区。生态环境状况分级见表 1,生态环境状况变化度分级见表 2。

表 1 生态环境状况分级

级别	优	良	一般	较差	差
指数	EI ≥ 75	55 ≤ EI < 75	35 ≤ EI < 55	20 ≤ EI < 35	EI < 20
意义	植被覆盖度高,生物多样性丰富,生态系统稳定	植被覆盖度较高,生物多样性较丰富,适合人类生活	植被覆盖度中等,生物多样性水平一般,较适合人类生存,但有不适合人类生存的制约性因子出现	植被覆盖较差,严重干旱少雨,物种较少,存在着明显限制人类生存的因素	条件较恶劣,人类生活受到限制

表 2 生态环境状况变化度分级

变化度	无明显变化	略微变化	明显变化	显著变化
指数	ΔEI < 1	1 ≤ ΔEI < 3	3 ≤ ΔEI < 8	ΔEI ≥ 8
意义	生态环境质量无明显变化	如果 1 ≤ ΔEI < 3, 则生态环境质量略微变好; 如果 -1 ≥ ΔEI > -3, 则生态环境质量略微变差	如果 3 ≤ ΔEI < 8, 则生态环境质量明显变好; 如果 -3 ≥ ΔEI > -8, 则生态环境质量明显变差; 如果生态环境状况类型发生改变, 则生态环境质量明显变化	如果 ΔEI ≥ 8, 则生态环境质量显著变好; 如果 ΔEI ≤ -8, 则生态环境质量显著变差

由于文献[12]未给出多年指数变化趋势评价方法, 现结合 Spearman 秩相关系数法评价“十二五”期间生态环境状况变化趋势, 给出时间周期 $Y_1 \dots Y_n$, 和其相应数值 C (即月均值、季均值或年均值 $C_1 \dots C_n$), 将 C 从大到小排列好, 在本研究中 $Y_1 \dots Y_n$ 指代 2011、2012、2013、2014、2015 年排列的序号, C 指代各年度对应的 EI, 秩相关系数的计算公式为:

$$r_s = 1 - [6 \sum_{i=1}^N d_i^2] / [N^3 - N] \quad (1)$$

式中: r_s ——秩相关系数;

d_i ——变量 X_i 和变量 Y_i 的差值;

X_i ——周期 1 到周期 N 按 C 从小到大排列的序号, 即将 2011—2015 年各年度 EI 从小到大排序而得到的序号;

Y_i ——按时间顺序排列的序号。

将秩相关系数 $|r_s|$ 同 Spearman 秩相关系数统计表中临界值 W_p 进行比较以确定变化趋势是否有显著意义, 如果 r_s 是正值则表明评价时段内有关统计量指标变化呈上升趋势, 如果 r_s 是负值则表明呈现下降趋势; 当 $|r_s| \leq W_p$ 表示变化趋势没有显著意义, 说明在评价时段内变化稳定或平稳。评价“十二五”期间生态环境状况变化趋势即周期为 5 年。查得周期 $N=5$ 时, $W_p=0.9$, 则当 $r_s \leq -0.9$ 时表示显著下降; 当 $r_s \geq 0.9$ 时表示显著上升; 当 $-0.9 < r_s < 0.9$ 时, 变化趋势不显著^[13]。

3 结果分析

3.1 “十二五”期间生态环境状况及变化特征

3.1.1 生态环境状况持续变好

(1) 广东省“十二五”期间 EI 及各分指数变

化情况见表 3。“十二五”期间, 广东省 EI 为 76.7 ~ 78.7, 级别为“优”, 2013 年 EI 达峰值 78.7, 见图 2(a)(b)(c)(d)(e)。2015 年全省 EI (EI = 77.6) 与 2011 年 (EI = 76.7) 相比, 上升了 0.9, 综合反映广东省生态环境整体状况优等, 且稳中趋好。但 5 年变化趋势不显著 ($r_s=0.2$)。

表 3 广东省“十二五”期间 EI 及各分指数变化情况^①

地区	Δ生物丰度指数	Δ植被覆盖指数	Δ水网密度指数	Δ土地胁迫指数	Δ污染负荷指数	ΔEI	r_s
清远	-0.9	0.6	13.8	-7.9	0.0	3.1	0.7
梅州	-0.7	0.1	4.9	-9.2	0.1	1.9	0.5
潮州	0.1	-0.3	7.9	-2.9	-0.9	1.7	0.2
茂名	0.0	-0.6	5.3	-4.1	-0.2	1.3	0.1
韶关	-1.7	0.8	8.2	-3.5	0.7	1.3	0.2
惠州	-0.5	-1.1	10.3	-0.2	-0.0	1.1	0.7
肇庆	-1.5	-1.7	10.9	-2.8	-0.0	1.1	0.1
广州	-0.5	-2.9	10.6	-1.2	-0.8	1.0	0.9
汕尾	-0.1	-2.0	5.8	-3.7	-0.1	0.9	0.1
佛山	-0.3	-3.0	7.4	-2.8	-1.3	0.8	0.9
云浮	-1.5	-1.8	4.9	-4.5	-0.3	0.5	0.3
阳江	-0.6	-1.4	5.8	-1.1	0.3	0.4	0.2
河源	-1.5	-0.5	6.3	0.4	-0.1	0.3	-0.1
江门	-0.3	-2.5	4.3	-2.0	-0.2	0.2	0.1
东莞	-0.6	-3.5	7.1	-0.6	1.7	-0.1	-0.3
揭阳	-1.0	-2.8	3.6	-0.8	-0.1	-0.4	-0.8
深圳	-0.7	5.7	-13.2	-1.4	-1.3	-0.4	-0.6
汕头	-0.6	-4.2	3.7	0.9	-0.8	-0.7	-0.6
珠海	-1.3	-1.5	0.0	1.2	-0.3	-1.0	-0.3
湛江	-0.3	-5.0	-1.0	-1.2	-0.4	-1.2	-0.6
中山	-0.9	-5.6	0.0	0.0	0.1	-1.7	-0.7
顺德区	-0.3	-8.8	0.0	-1.7	-1.4	-1.9	-0.1
广东省	-0.8	-1.2	6.8	-3.2	-0.1	0.9	0.2

① ΔEI = 2015 年 EI - 2011 年 EI, 其他分指数类似。

(2) “十二五”期间, 21 地市及顺德区的 EI 为 58.1 ~ 84.1, 级别为“优”“良”, 其中韶关、河源、惠

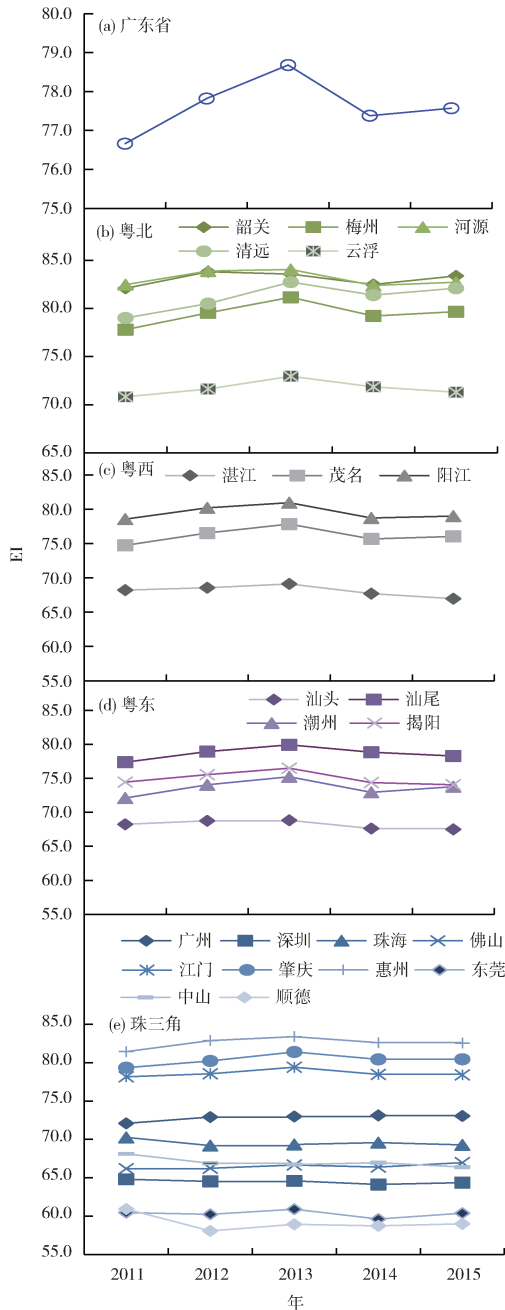


图 2 广东省四大区域地市“十二五”期间 EI 时间曲线分布

州三市 EI 为全省三甲,说明其植被覆盖度高,生物多样性丰富,生态系统稳定。从时间分布曲线来看,各地市生态环境状况出现不同程度的波动变化,大多数地市 EI 在 2011—2013 年间稳步上升,2014 年少许下降,2015 年又有所回升,2013 年河源 EI 达 84.1,为这 5 年间全省各地市中的最高值。大多数地市 2015 年 EI 相对于 2011 年有不同程度的上升。就 5 年变化趋势而言,仅广州和佛山的

$r_s = 0.9$,其 5 年生态环境状况呈显著上升趋势,其他地市 5 年生态环境变化趋势不显著。

3.1.2 生态环境状况优等面积不断扩大

(1)粤北 5 地市 EI 为全省四大区域中最高,为 70.8 ~ 84.1,除云浮外,其他 4 地市 EI 级别均为“优”,其生态环境状况皆呈现不同程度上升 ($\Delta EI > 0$),其中清远 $\Delta EI = 3.1$,生态环境状况明显变好,韶关和梅州生态环境状况略微变好,其他 2 地市变化不明显。粤西 3 地市 EI 为 67.0 ~ 81.0,其中阳江 EI 为此区域最高,茂名次之,湛江最低;这 3 地市生态环境状况变化不大,其中湛江和茂名发生略微变化,阳江变化不明显。粤东 4 地市 EI 为 67.5 ~ 79.9,其中汕尾 EI 为此区域最高,且 5 年间 EI 级别均为“优”,汕头 EI 为最低;除潮州生态环境状况略微变好以外,其他 4 地市变化不明显。珠三角 9 市和顺德区 EI 为 58.1 ~ 83.4,其中惠州 EI > 81 ,为珠三角最高,而顺德和东莞 EI 为珠三角乃至广东省倒数一二名,说明珠三角地市生态环境状况差异较大;有 5 地市和顺德区生态环境状况发生略微变化,即广州、肇庆、惠州略微变好,中山、珠海和顺德区略微变差,其他 4 地市变化不明显。

(2)2015 年,21 地市及顺德区的 EI 为 59.0 ~ 83.4,级别为“优”和“良”,且分别占比 45.5% 和 54.5%,其中韶关、河源、惠州等 10 地市的生态环境状况为“优”,揭阳、潮州和广州等 11 地市和顺德区的生态环境状况为“良”。空间分布上,生态环境状况级别为“优”的地市主要集中分布在南部沿海及粤北、粤东山区,级别为“良”的地市主要分布在珠三角、潮汕平原、雷州半岛,见图 3。

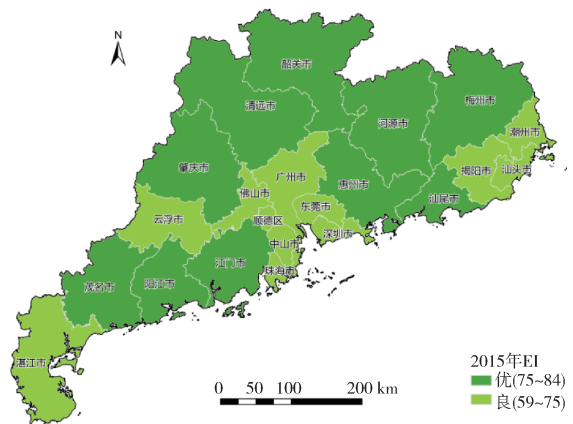


图 3 广东省 2015 年地市 EI 空间分布

(3)生态环境状况优等的地市面积占全省面积比例 2015 年比 2011 年提高了 6%。“十二五”期间,有 54.5% 的评价单元即 11 地市和顺德区的 EI 出现不同程度的变化,其中清远生态环境状况明显变好($3 \leq \Delta EI < 8$),梅州、潮州、茂名等 7 地市生态环境状况略微变好($1 \leq \Delta EI < 3$),且茂名 EI 等级由“良”转为“优”,珠海、湛江、中山及顺德区生态环境状况略微变差($-3 < \Delta EI \leq 1$);其余 45.5% 的评价单元(10 地市)的生态环境状况无明显变化($|\Delta EI| < 1$)。各地市及顺德区生态环境状况空间变化分布见图 4。

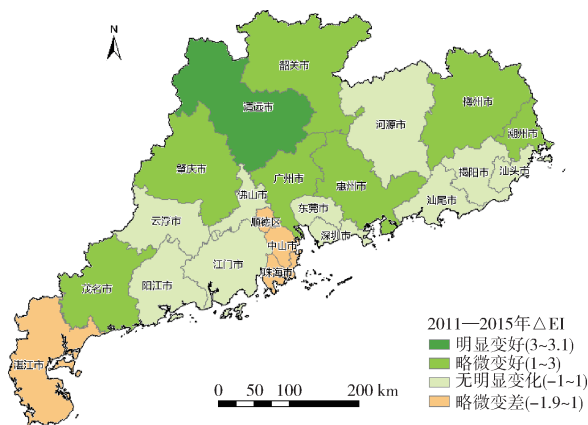


图 4 广东省 2011—2015 年地市 EI 变化空间分布

3.2 生态环境状况影响因素和变化原因

3.2.1 影响因素

“十二五”期间,广东省 21 个地市及顺德区各项分指数中,水网密度指数整体变化幅度较大,其他 4 项分指数变化相对较小。各地市及顺德区水网密度指数为 $-13.2 \sim 13.8$,变化较大,清远等 19 地市和顺德区的水网密度指数呈现不同程度的上升。水网密度指数与水资源总量的丰沛情况密切相关,从一定程度上来说,水资源总量在常年值附近呈现小周期的丰枯交替变化是导致 EI 波动变化的主要原因。广东省水利厅发布的 2011—2015 年《广东省水资源公报》显示,2011 年属枯水年,全省年水资源总量比常年偏少 19.6%;2012 和 2013 年属丰水年,这两年的水资源总量比常年(多年平均)分别偏多 10.7% 和 23.7%;2015 年水资源总量较常年略增,较常年偏多 5.7%。

各地市及顺德区土地胁迫指数为 $-9.2 \sim 1.2$,土地胁迫程度呈现变弱的趋势,梅州等 18 地市和

顺德区的土地胁迫指数呈现不同程度的下降,呈现显著变弱 1 地市,明显变弱 5 地市。土地胁迫指数的变化与中度和重度程度的土壤侵蚀情况密切相关。据广东省水利厅 2013 年发布的广东省第四次水土流失遥感普查报告显示,从自然侵蚀面积来看,整体侵蚀程度下降较为明显,中度以上等级的土壤侵蚀面积明显减少,另外人为侵蚀面积明显减少,特别是生产建设用地侵蚀面积减少较多。

各地市及顺德区污染负荷指数整体变化不大,但佛山等 13 地市及顺德区污染负荷指数呈现不同程度的下降。“十二五”期间,广东省超额完成减排任务,2015 年广东省 SO_2 、 NO_x 、 COD 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的排放量分别比 2010 年分别减少 19.2%,24.7%,16.9% 和 15.1%,分别超额完成“十二五”减排目标任务 41%,13%,30% 和 46%。全省承载的污染负荷压力减轻。

综合上述各项因素变化,广东省及各地市生态环境状况变化的主要影响因素相对一致,但不同区域的主导影响因素有一定的差别。例如粤北的清远 EI 明显变好和梅州 EI 略微变好,主要是由于水网密度指数大幅升高和土地胁迫指数大幅降低。而珠三角的中山和顺德区 EI 略微变差主要在于植被覆盖指数降低。

3.2.2 变化原因

(1)各项分指数总体保持稳定是生态环境状况保持稳定的主要原因。除水网密度指数外,其他各项分指数的变化幅度均以“无明显变化”或“略微变化”为主,这是 EI 总体保持稳定的重要保障;

(2)水资源总量和降水量的提升是生态环境质量有所提升的重要原因。各项分指数中,以水网密度指数变化幅度最大,2015 年相对于 2011 年多数地区均大幅提升,使得大多数地市 2015 年 EI 较 2011 年有所提升。2011—2015 年水资源总量呈现丰枯交替变化是造成 EI 波动变化的主要原因;

(3)土地胁迫压力和环境污染负荷压力下降有效促进生态环境质量改善。这 2 项指数的下降,反映了“十二五”期间广东省在水土保持、科学规划土地利用方式、污染物减排和环境污染治理等方面的努力取得了明显成效。

4 结论

(1)广东省和 21 个地市及顺德区 EI 呈现一定波动,且全省和多数地市 EI 在 2013 年出现峰值。

(2) 5 年间广东省生态环境状况级别均为“优”,反映出广东省植被覆盖度高,生物多样性丰富,生态系统稳定;21 个地市及顺德区生态环境状况均属于“优”“良”级别,从空间分布来看,粤北地市 EI 为广东省 4 大区域中整体最高,各地市生态环境状况存在一定的地域差异。

(3) 广东省生态环境状况稳中趋好,绝大多数地市生态环境状况变好,粤北地市 EI 整体上升。就 5 年变化趋势而言,除广州、佛山生态环境状况呈现显著上升趋势,其他地市变化不显著。

(4) 各项指数整体上变化不大,自然生态系统相对稳定是生态环境状况保持稳定的根本保障;从一定程度上讲,污染减排和水土治理降低了污染负荷的压力和土地胁迫的强度,这有效促进生态环境状况改善;由水资源总量丰枯交替变化引起水网密度指数的大幅度变化是导致生态环境状况波动变化的主要原因。

[参考文献]

- [1] 中国环境监测总站. 生态环境监测技术[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [2] JOHN T L. The role of GIS in landscape assessment: using land - use - based criteria for an area of the Chiltern Hills Area of Outstanding Natural Beauty[J]. Land Use Policy, 1999, 16(1): 23 - 32.
- [3] REID R S, KRUSKA R L. Land - use and land - cover dynamics in response to changes in climatic, biological and socio - political forces: the case of southwestern Ethiopia[J]. Landscape Ecology, 2000, 15(4), 339 - 355.
- [4] 万本太, 王明霞, 付德黔, 等. 中国环境监测技术路线研究[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2003.
- [5] 中国环境监测总站. 中国生态环境质量评价研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [6] 刘海江, 张建辉, 何立环, 等. 我国县域尺度生态环境质量状况及空间格局分析[J]. 中国环境监测, 2010(6): 62 - 65.
- [7] 孙东琪, 张京祥, 朱传耿, 等. 中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析[J]. 地理学报, 2012, 67(12): 1599 - 1610.
- [8] 李洪义, 史舟, 郭亚东, 等. 基于遥感与 GIS 技术的福建省生态环境质量评价[J]. 遥感技术与应用, 2006(1): 49 - 54.
- [9] 李旭文, 牛志春, 姜晟, 等. Landsat 8 卫星 OLI 遥感影像在生态环境监测中的应用研究[J]. 环境监控与预警, 2013, 5(6): 1 - 5.
- [10] 孟岩, 赵庚星. 基于卫星遥感数据的河口区生态环境状况评价: 以黄河三角洲垦利县为例[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2): 163 - 167.
- [11] 张媛, 望志方, 陈楠, 等. 湖北省生态环境状况时空变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S2): 300 - 305.
- [12] 环境保护部. 生态环境状况评价技术规范: HJ 192—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [13] 万黎, 毛炳启. Spearman 秩相关系数的批量计算[J]. 环境保护科学, 2008, 34(5): 53 - 55.
- [14] ZIMMERMANN J, GONZALEZ A, JONES M, et al. Assessing land - use history for reporting on cropland dynamics - A case study using the Land - Parcel Identification System in Ireland [C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2016.
- [15] 钱峻屏, 李岩, 廖其芳, 等. 利用遥感植被指数分析中国东部样带农业生态系统的生产力格局[J]. 生态学杂志, 2001, 20(6): 46 - 49.
- [16] MU X, HU M, SONG W, et al. Evaluation of sampling methods for validation of remotely sensed fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing, 2015, 7(12): 16164 - 16182.
- [17] 石菊松. 基于遥感和地理信息系统的滑坡风险评估关键技术研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
- [18] 欧阳志云, 张路, 吴炳方, 等. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 219 - 226.
- [19] 罗春雨, 张弘强, 高玉慧, 等. 松花江哈尔滨段生态系统格局分异特征研究[J]. 国土与自然资源研究, 2017(4): 31 - 34.
- [20] 李生宇, 雷加强. 额尔齐斯河流域生态系统格局及变化[J]. 干旱区研究, 2002(2): 56 - 61.
- [21] 李霞, 杜世勋, 桑满杰, 等. 山西省自然保护区生态系统格局及稳定性变化趋势研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(2): 208 - 218.
- [22] 孔令桥, 张路, 郑华, 等. 长江流域生态系统格局演变及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 741 - 749.
- [23] 邓伟, 刘红, 袁兴中, 等. 三峡库区水源涵养重要区生态系统格局动态演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 661 - 668.
- [24] 郭建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 99 - 119.
- [25] 张娜. 生态学中的尺度问题: 内涵与分析方法[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2340 - 2355.
- [26] MCGARIGAL K, CUSHMAN S A, ENE E. FRAGSTATS v4: Spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps [CP/OL]. (2012) [2018 - 11 - 21]. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- [27] 孔令桥, 张路, 郑华, 等. 长江流域生态系统格局演变及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 741 - 749.

(上接第 9 页)