

DOI: 10.5846/stxb202003260701

于天舒,郑拴宁,朱捷缘,唐明方,董仁才,王岩.南水北调中线工程水源地南阳市生态安全评价研究.生态学报,2021,41(18):7292-7300.

Yu T S, Zheng S N, Zhu J Y, Tang M F, Dong R C, Wang Y. Evaluation on the ecological security status in Nanyang city, the water source region of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project in China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7292-7300.

南水北调中线工程水源地南阳市生态安全评价研究

于天舒^{1,2}, 郑拴宁¹, 朱捷缘^{1,2}, 唐明方^{3,*}, 董仁才¹, 王 岩⁴

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

4 赤峰市自然资源局, 赤峰 024000

摘要:以南水北调中线工程水源地南阳市为研究区,结合统计数据与遥感数据,基于GIS平台和压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)模型,选取了16个关键指标,从生态压力、生态状态和生态响应3个方面构建了生态安全评价体系。对2000年、2010年和2015年南阳市-丹江口水库汇水区-水渠缓冲区3个维度的生态安全水平进行评价,并对其时空演变特征进行分析。结果表明:(1)2000年、2010年和2015年,南阳市生态安全指数(Ecological Security Index, ESI)均值分别为48.88、49.76、50.60,丹江口水库汇水区 ESI 均值分别为51.52、52.80、53.70,干渠周边 ESI 均值分别为47.98、49.57、51.02,均呈现缓慢增加的趋势,总体上南阳市生态安全水平有所改善。(2)从空间来看,南阳市生态安全水平总体上呈现出西北高、东南低的空间分布特征。2000—2015年,南阳市西部地区整体呈现增加趋势,而东部地区整体呈减小趋势。(3)南阳市各行政单元生态安全水平具有明显的区域差异。2000—2015年,ESI 均值最大的是淅川县,最小的是新野县,处于一般安全的区县共6个,较低安全水平的区县共6个。淅川县、内乡县、邓州市和市辖区生态安全水平有所提高,社旗县生态安全水平明显下降。(4)南阳市生态安全水平与生态状态指标的相关性整体较高,与生态响应指标的相关性较低。研究结果可为南水北调水源区其他城市的生态安全建设和规划提供参考。

关键词:生态安全;南水北调中线工程;水源地;“压力-状态-响应”模型;南阳市

Evaluation on the ecological security status in Nanyang city, the water source region of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project in China

YU Tianshu^{1,2}, ZHENG Shuanning¹, ZHU Jieyuan^{1,2}, TANG Mingfang^{3,*}, DONG Rencai¹, WANG Yan⁴

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Chifeng Natural Resources Bureau, Chifeng 024000, China

Abstract: Combining the statistical data and the remote sensing data in Nanyang, China, the water source of the Middle Route Project of South-to-North Water Transfer, we selected 16 key indicators to construct ecological security assessment system from three aspects of ecological pressure, ecological status and ecological response. This system was established by GIS platform and Pressure-State-Response (PSR) model. We evaluated the ecological safety level of the three dimensions of Nanyang City-Danjiangkou Reservoir Catchment Area-Water Canal Buffer Zone in 2000, 2010 and 2015, and analyzed its

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503405)

收稿日期:2020-03-26; 修订日期:2021-08-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mftang@rcees.ac.cn

temporal and spatial evolution characteristics. Results showed: (1) In 2000, 2010 and 2015, the mean values of the Ecological Security Index (ESI) of Nanyang City were 48.88, 49.76, and 50.60, respectively. The mean values of ESI in the catchment area of the Danjiangkou Reservoir were 51.52, 52.80, and 53.70, respectively. The average ESI values of the buffer zone of main canal were 47.98, 49.57, 51.02. Results have shown a slow increase trend, and the overall ecological security level of Nanyang City has improved. (2) From a spatial perspective, the ecological security level of Nanyang City from 2000 to 2015 showed a trend of high in the northwest and low in the southeast. The western region of Nanyang showed an overall increasing trend, and the eastern showed a decreasing trend. (3) There are obvious regional differences in the ecological security level of various administrative units in Nanyang City. From 2000 to 2015, the largest average ESI was Xichuan County, and the smallest was Xinye County. There were 6 districts in general safety levels, and 6 districts in lower safety levels. The level of ecological security of Xichuan, Neixiang, Dengzhou and Nanyang city area have been significantly improved. The level of ecological security in Sheqi County has been significantly reduced. (4) The overall correlation between the ecological security level of Nanyang and the ecological status indicators is relatively high, but the correlation with the ecological response indicators is low. The research results can provide references for the ecological safety construction and planning of other cities in the water source area of the South-to-North Water Diversion.

Key Words: ecological security; the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project; water source region; Pressure-State-Response (PSR) model; Nanyang City

随着社会经济的快速发展,人类活动强度大、自然资源开发利用不合理等多重压力的存在,对生态环境资源产生了巨大影响,导致土地退化、生态系统服务功能降低、城市无序扩张、景观破碎化、生物多样性降低、水污染等生态环境问题日益严峻,严重威胁区域生态安全,制约生态-社会-经济可持续发展^[1-2]。所谓生态安全,有广义和狭义两种理解,广义上指的人的生活、健康、安乐、基本权利、生活保障来源、必要资源、社会秩序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态,包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全,组成一个复合人工生态安全系统;狭义上是指自然和半自然生态系统的安全,即生态系统的完整性和健康水平的整体反映^[3]。目前,国内外学者对生态安全已有深入研究,包括生态安全概念内涵^[4-8]、评价方法^[9-11]、管理对策^[12-13]等多个方面。跨流域调水工程水源区的生态安全问题作为调水工程成败的关键,也是诸多学者关注和研究的热点之一^[14-17]。

南水北调工程起源于河南省南阳市丹江口水库,是我国规模宏大的跨流域调水工程,对于缓解我国华北地区水资源短缺问题和促进区域间协调发展具有重要作用^[15]。同时,南水北调工程建设和跨流域调水也会改变周边地区土地利用和土地覆被状况^[18],影响水源区水量和水质,威胁生态系统健康和生态安全。因此,研究调水工程水源区生态安全状况,对于保障水源区生态建设和供水安全,实现调水区域的生态安全和可持续发展至关重要。

目前,我国学者从不同视角对南水北调工程水源区生态安全进行了研究,如水源区水质评价^[19-20]、景观格局变化特征分析^[21]、生态安全评价^[22-23]、生态补偿标准制定^[24-26]等。尽管已有研究应用“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response, PSR)模型对丹江口库区和南阳市生态安全进行评价^[27-28],但仅选用统计数据对区域(行政区)尺度生态安全状况进行评估,并没有考虑土地利用类型、植被覆盖度等空间数据,评价结果难以准确反映水源区生态安全空间分布特征及邻近空间对其影响的关系。

因此,本研究以南水北调中线工程水源地南阳市为例,构建了基于 PSR 框架的生态安全评价指标体系,结合统计数据和遥感数据,对 2000、2010、2015 年南阳市、丹江口汇水区、干渠缓冲区生态安全时空变化特征进行分析,并进一步分析了南阳市生态安全变化驱动因素,最后提出相应的对策和建议。本研究能够有效识别南阳市生态安全水平较低的区域,厘清影响其生态安全的主要因素,为政府管理部门精准实施生态工程提供决策依据,对于保障南水北调中线工程高效安全运行和周边区域用水安全具有重要意义。

1 研究区概况

南阳市是南水北调中线工程水源地和渠首所在地,位于河南省西南部(东经 $110^{\circ}58'$ — $113^{\circ}49'$,北纬 $32^{\circ}17'$ — $33^{\circ}48'$,图 1),市辖 1 市 2 区 10 县,总面积约为 2.65 万 km^2 。南阳市东西北三面环山,南部为南阳盆地,地貌类型复杂多样,地处北亚热带向暖温带过渡地带,属典型的季风大陆半湿润气候,四季分明。市内水系发达,分属汉水流域、淮河流域、黄河流域。南水北调工程水源丹江口水库位于淅川县,工程干渠由市域西南部向东北部延伸,贯穿南阳市。2018 年末,全市 GDP 达到 3566.77 亿元,年末总人口为 1198.07 万人,城镇化率达到 46.23%。

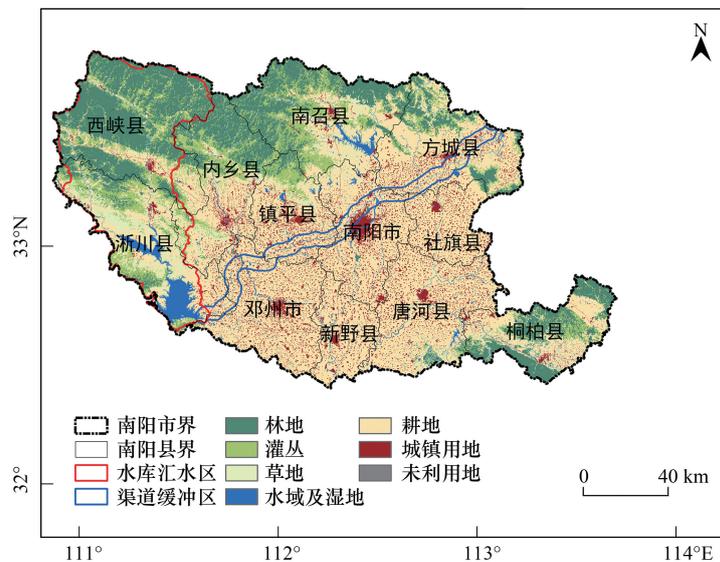


图 1 研究区域位置

Fig.1 Location of the study area

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

本研究主要涉及四种数据类型。生态系统类型数据来源于生态系统十年评估研究成果(<http://www.ecosystem.csdb.cn/>),包括林地、灌丛、草地、水域及湿地、耕地、城镇用地和未利用地 7 类用地类型,空间分辨率为 30 m。数字高程模型(DEM)来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供的美国地质调查局(U.S. Geological Survey, USGS) SRTM 数据,空间分辨率 30 m,用于计算地形位指数。NDVI 数据来源于美国地质调查局官网(<https://lpdaac.usgs.gov>)空间分辨率 250 m,用于计算植被覆盖度指数^[29]。统计数据来源于南阳市统计年鉴(2001 年、2011 年、2016 年)以及河南省水资源公报(2000 年、2010 年、2015 年),并使用 ArcGIS 软件实现栅格化。空间数据坐标系统投影为 China_Lambert_Conformal_Conic,数据重采样后分辨率均为 30 m×30 m。

2.2 生态安全评价指标体系构建

本研究结合水源区生态系统自身特点,遵循数据可靠性、易获取性、科学代表性、系统完整性、指标多样性与层次性等原则,构建了基于 PSR 框架的南阳市生态安全评价指标体系,包含 1 个目标层、3 个准则层、16 个指标层。生态压力指标主要用于反映人类生产生活活动对生态系统产生的干扰和破坏^[30-31],生态状态指标主要用于反映土地利用强度和生态环境质量状况,生态响应指标主要用于反映针对生态问题的管理政策和治理措施,其中生态压力和生态响应指标为统计数据、生态状态指标为遥感数据。对要素指标进行标准化处理

消除矢量单位的影响,然后采用层次分析法^[32]结合文献调查及专家打分确定指标权重,具体指标、指标含义及权重如表 1 所示。

表 1 南阳市生态安全评价指标体系

Table 1 The evaluation index system used to assess the ecological security of Nanyang City

准则层 Criteria Layer	权重 Weight	评价指标 Evaluation Indicator	指标意义 Index significance	指标趋向 Trend	权重 Weight
生态压力 Ecological pressure index	0.260	人均水资源量 (Var.1)	反映研究区水资源现状	正向	0.039
		人均耕地面积 (Var.2)	反映耕地现状、国民经济和农业生产发展需求	正向	0.020
		人口密度 (Var.3)	反映人口分布现状、社会经济发展需求	负向	0.067
		单位面积耕地化肥施用量 (Var.4)	反映化肥使用造成的污染强度	负向	0.080
		城镇化率 (Var.5)	反映因人口向城市聚集而导致的经济社会变化程度	负向	0.020
		经济密度 (Var.6)	反映城市经济活动效率和土地利用的密集程度	负向	0.034
生态状态 Ecological state index	0.413	生态弹性度 (Var.7)	反映生态环境受到干扰后恢复能力 ^[33-34]	正向	0.120
		地形位指数 (Var.8)	反映坡度、坡向、高程对生态系统的影响	正向	0.077
		植被覆盖率 (Var.9)	反映生态系统质量状况和生态系统服务功能	正向	0.097
		多样性指数 (Var.10)	反映土地利用类型多样化程度、景观结构的复杂程度	正向	0.036
		均匀度指数 (Var.11)	反映土地利用类型均匀化程度	正向	0.054
		景观破碎度 (Var.12)	反映景观被分割的破碎程度	负向	0.028
生态响应 Ecologica response Index	0.327	生活垃圾无害化处理率 (Var.13)	反映环境治理水平	正向	0.094
		污水处理率 (Var.14)	反映环境治理水平	正向	0.111
		R&D 占 GDP 比例 (Var.15)	反映科技投入水平	正向	0.055
		人口受教育程度 (Var.16)	反映教育水平	正向	0.067

R&D:研究与试验发展 Research and development;Var.:变量 Variable

2.3 生态安全指数

生态安全指数(ESI)反映了指标因子对生态安全的影响程度和生态环境抵御胁迫的能力,指数越高表明生态安全水平越高。本研究通过 ArcGIS 10.2 的 Raster Calculator 工具计算获取 2000—2015 年南阳市生态安全指数。参考相关文献^[27-28, 35-36],并结合研究区实际情况,将 ESI 分为 5 个安全等级:低度安全(0.00—40.00)、较低安全(40.00—50.00)、一般安全(50.00—60.00)、较高安全(60.00—80.00)、高度安全(80.00—100.00)。生态安全指数计算公式如下所示:

$$ESI = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i$$

式中,ESI 为南阳市生态安全评价指数,ESI 为指标 C_i 标准化后的指标值, W_i 为指标的权重值。

3 结果

3.1 南阳市生态安全水平时空变化

2000、2010、2015 年南阳市生态安全指数平均值分别为 48.88、49.76、50.60,整体处于上升趋势;3 个时期生态安全水平分别处于较低安全、较低安全、一般安全,生态安全状况有所改善。从空间分布上看(图 2),2000、2010、2015 年南阳市生态安全水平均呈现出西北高、东南低的趋势,整体处于较低水平;同时在西峡县、内乡县、桐柏县等县区内部也存在明显区域差异。2000—2015 年南阳市生态安全水平变化具有明显的区域差异:西部地区 ESI 整体呈增加趋势,其中西峡县增幅较小,南阳市增幅明显,超过 10%;东部地区 ESI 整体呈减小趋势,其中社旗县减小幅度较大。

统计结果显示(图 3),2000 年南阳市低度安全、较低安全、一般安全、较高安全、高度安全的面积分别为 380、13590、11590、10、0 km²;2010 年南阳市低度安全、较低安全、一般安全、较高安全、高度安全的面积分别为

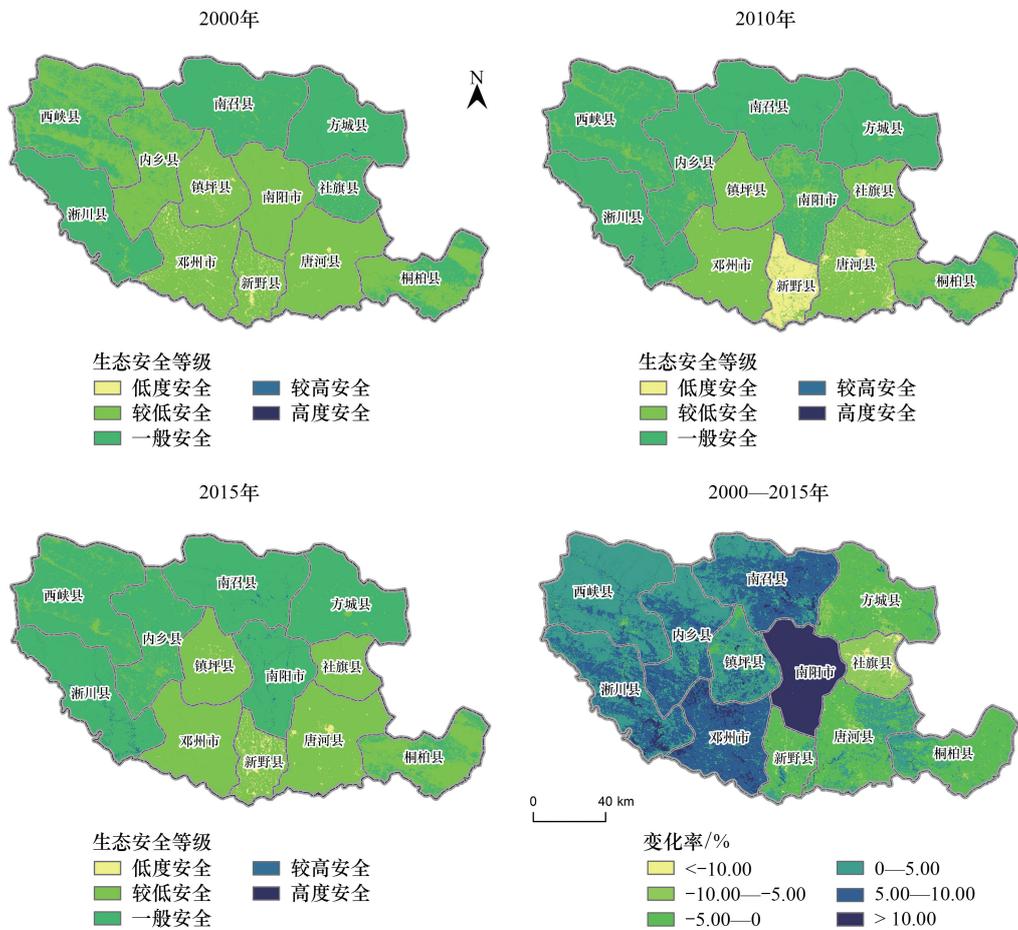


图 2 2000—2015 年南阳市生态安全等级图

Fig.2 The distribution of ecological security degrees in Nanyang City from 2000 to 2015

1280, 9380, 14860, 40, 0 km²; 2015 年南阳市低度安全、较低安全、一般安全、较高安全、高度安全的面积分别为 270, 9920, 15250, 130, 0 km², 3 个时期生态安全水平整体较低, 有待进一步改善。2000—2015 年南阳市较低安全水平面积明显减少(27.01%), 一般安全水平面积明显增加(31.58%), 较高安全水平面积也呈现一定的增加趋势。

2000—2015 年南阳市各行政单元生态安全水平具有明显的区域差异(图 4), ESI 均值从大到小依次为浙川县>方城县>南召县>市辖区>西峡县>内乡县>桐柏县>社旗县>邓州市>镇坪县>唐河县>新野县, 其中生态安全水平处于一般安全的县区有 6 个, 处于较低安全的县区有 6 个, 研究时段内均未出现生态安全等级为高度安全、较高安全和低度安全的县区, 生态安全水平为一般安全的县区数量有所增加。2000—2015 年南阳市浙川县、内乡县、邓州市 3 个南水北调水源区以及南阳市辖区生态安全水平明显提高, 社旗县生态安全水平呈降低趋势, 而唐河县和新野县在 2010 年出现一个明显的转折。

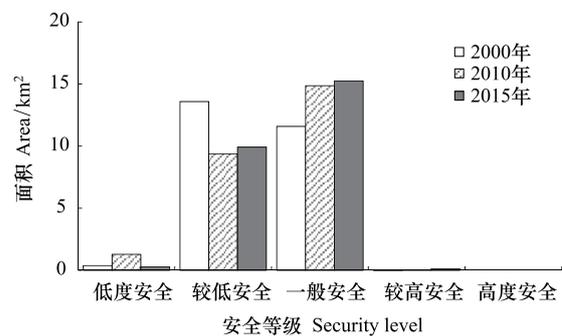


图 3 南阳市生态安全等级面积分布

Fig.3 Area distribution of ESI levels in Nanyang City

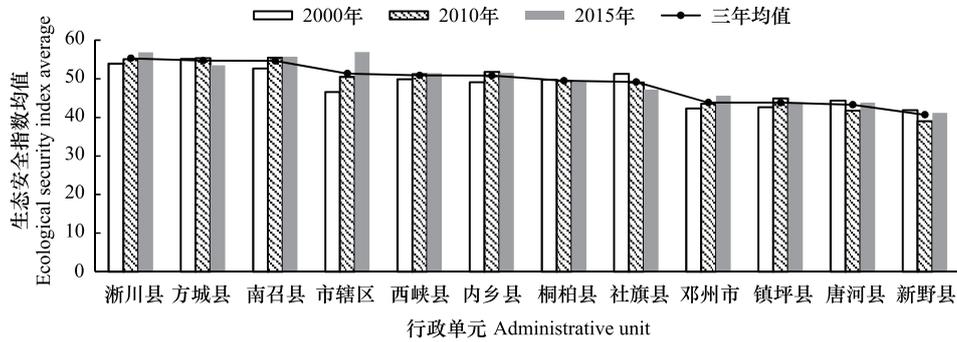


图 4 2000—2015 年南阳市各行政单元平均生态安全指数

Fig.4 Average ESI value of each administrative region unit in Nanyang City from 2000 to 2015

3.2 丹江口水库汇水区及干渠周边生态安全水平时空变化

2000、2010、2015 年丹江口水库汇水区生态安全指数均值分别为 51.52、52.80、53.70,整体处于上升趋势,生态安全水平有所提升。空间上(图 5),丹江口水库汇水区生态安全水平整体呈现出南部高、北部低的趋势,具有明显的区域差异,特别是 2000 年北部地区大部分区域处于较低安全水平。2000—2015 年丹江口水库汇水区生态安全水平整体均呈现明显的增加趋势,北部地区较低安全水平面积大幅度减少,南部地区逐渐出现较高安全水平面积分布。

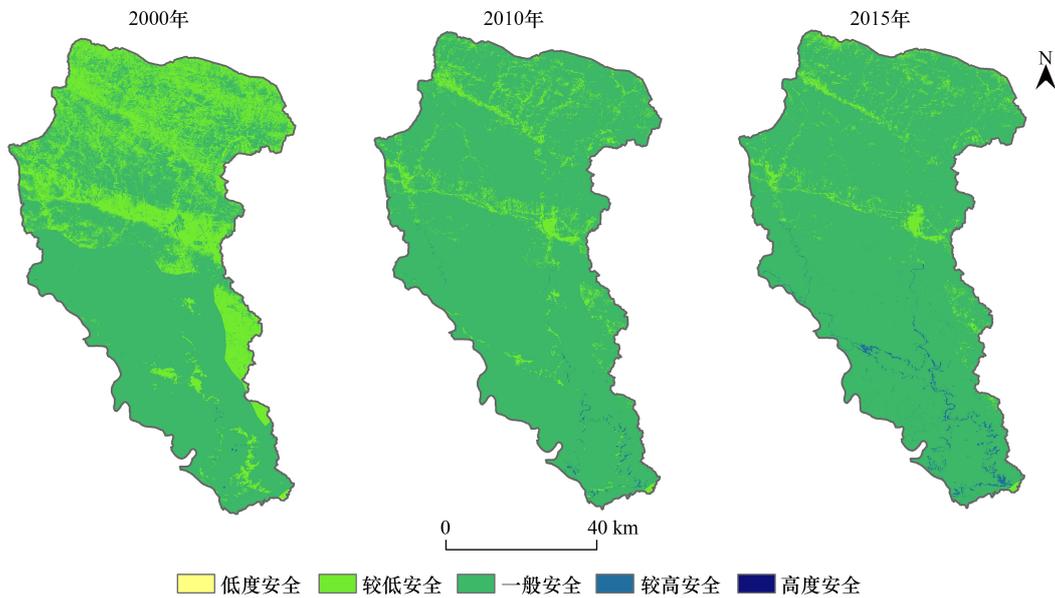


图 5 南阳市丹江口水库汇水区生态安全等级分布图

Fig.5 The distribution of ecological security degrees of Danjiangkou Reservoir catchment area

为了进一步分析南水北调工程干渠生态安全状况,本研究以干渠两侧 3 km 为缓冲半径,提取得到南水北调干渠缓周边生态安全状况(图 6)。2000、2010、2015 年南水北调工程干渠缓冲区生态安全指数均值分别为 47.98、49.57、51.02,整体处于上升趋势。南水北调工程干渠下游生态安全水平明显高于上游区域。

3.3 南阳市生态安全影响因素

生态压力指数、生态状态指数、生态响应指数对 2000—2015 年南阳市生态安全指数贡献度增加量存在明显差异,生态相应指数的变化幅度最大,生态状态指数变化幅度最小。如图 7 所示,生态压力指数对生态安全

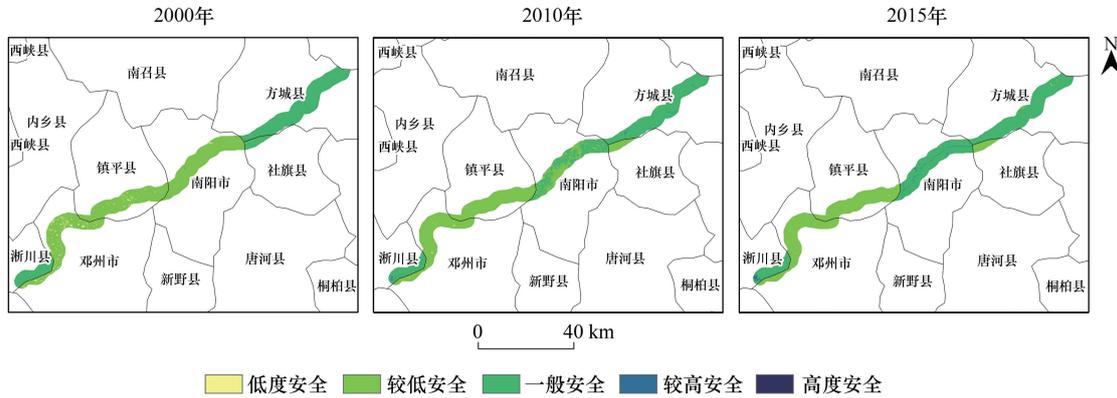


图 6 南阳市南水北调中线工程水渠周边生态安全等级分布图

Fig.6 The distribution of ecological security degrees within a 3 km buffer zone for the channel of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project in Nanyang City

指数的贡献度增加量均为负值, 贡献度明显减少, 其中市辖区、邓州市、新野县、社旗县的贡献度增加量低于-10%; 生态状态指数对生态安全指数的贡献度增加量有正有负, 以负值为主, 但变化幅度整体相对较小, 其中市辖区的贡献度增加量低于-10%; 而生态响应指数对生态安全指数的贡献度增加量均为正值, 且变化幅度均相对较大, 其中市辖区、邓州市、西峡县、新野县、南召县、内乡县的贡献度增加量大于 10%, 仅有唐河县的贡献度增加量小于 5%。

根据 Pearson 相关分析结果(表 2), 不同时期南阳市生态安全水平影响因素存在差异, 且生态安全水平与生态状态指标的相关性整体较高, 与生态响应指标的相关性较低。2000 年, 南阳市生态安全水平与人口密度、单位面积化肥施用量、生态弹性度、均匀度指数四个指标显著相关; 2010 年, 南阳市生态安全水平与单位面积化肥施用量、生态弹性度、多样性指数、均匀度指数四个指标显著相关; 2015 年, 南阳市生态安全水平与多样性指数、均匀度指数两个指标显著相关; 2000—2015 年生态安全水平与生态响应指标之间不存在显著相关关系。

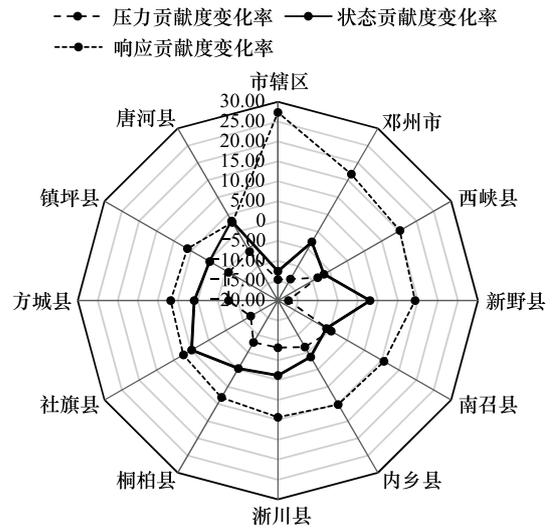


图 7 南阳市各区县生态压力、状态、响应指数贡献度增加量
Fig.7 The contribution increases of ecological pressure, state and response index in Nanyang city

表 2 南阳市生态安全指数与影响因素相关分析结果

Table 2 Correlation analysis results of ESI and influencing factors in Nanyang City

年份 Year	Var.1	Var.2	Var.3	Var.4	Var.5	Var.6	Var.7	Var.8	Var.9	Var.10	Var.11	Var.12	Var.13	Var.14	Var.15	Var.16
2000	0.316	0.568	-0.668 *	-0.696 *	-0.042	-0.595	0.584 *	-0.131	-0.338	0.575	0.635 *	-0.169	0.186	-0.117	-0.251	0.355
2010	0.140	0.221	-0.512	-0.704 *	0.099	-0.469	0.674 *	-0.337	-0.445	0.710 **	0.787 **	0.328	0.338	0.086	-0.026	0.009
2015	-0.051	-0.043	-0.227	-0.551	0.262	-0.270	0.573	-0.469	-0.310	0.602 *	0.610 *	0.355	0.225	0.365	0.389	-0.032

* 表示在 0.05 水平显著; ** 表示在 0.01 水平显著

4 讨论

南阳市各地区生态环境条件、社会发展水平存在差异,导致区域内生态安全水平时空差异明显。空间上,南阳市西北部地区以林地、草地、灌丛等生态用地为主,同时还是丹江口水库汇水区所在地,生态质量高,生态压力小,因此生态安全水平相对较高;而在东南部地区以耕地、建设用地等人类活动强度较大的用地类型为主,生态干扰大,生态环境质量相对较低,因此生态安全水平处于较低水平。时间上,随着人们生态环境保护意识的增强,人为造成的生态环境破坏问题得到缓解,生态环境压力不断减小,生态环境状态持续改善,加上退耕还林、污染治理、生态恢复的重要措施的大力实施,使得区域内生态安全水平得到明显改善和提高。南阳市市辖区城镇用地的扩张给区域内生态环境造成巨大压力,但是市辖区经济发展水平高,科技投入、环保技术水平高,很大程度上弥补甚至超过了生态压力对生态安全水平的贡献度。

南阳市生态安全水平整体上得到了持续改善,但仍然处于相对较低的水平,2000、2010、2015年区域内生态安全等级主要为较低安全和一般安全,较高安全水平以上的面积均低于1%,因此还有很大的提升空间。尤其是在东南部地区的唐河、社旗、新野、镇坪等农业种植区,要严格控制农药化肥施用量,倡导使用有机肥,同时加强点源、面源污染治理力度,防治生态环境污染;同时加强农田道路两旁生态廊道体系建设和河渠两边生态环境保护,提高景观多样性,改善景观破碎化;合理控制城镇无序扩张,加强城市生态空间管理,对于城市绿地的数量、质量、空间布局进行合理规划,全面提升城市生态系统服务功能。而在西北部的淅川、西峡、内乡、南召等县区,基于良好的生态环境本底,继续强化森林植被保护和抚育,提升植被覆盖率;加强丹江口水库汇水区以及南水北调工程沿线生态保护与修复,保障南水北调工程供水安全,全面提升南阳市生态安全水平。

本研究从宏观角度对南水北调工程实施前和通水后,南阳市各区县、丹江口汇水区和干渠周边生态安全水平进行了分析。不仅需要社会、经济数据等作为生态响应数据,还需要能够反映自然生态系统状态的空间数据。与常规的仅用统计数据构建综合指标体系的方法相比,我们的研究结合了植被覆盖度、地形位指数等空间栅格数据,并将评价结果落实到空间栅格上,不仅不能够显示南阳市不同县区之间的差异,也能够显示出各个县区内部的区域差异,具有良好的可视化效果和实用性。

需要指出的是,为了便于在时间维度上进行生态安全水平的比较,本研究将2000年、2010年和2015年3期指标值进行统一标准化。数据标准化是相关研究中的基本问题,但针对不同时期开展评价时,目前尚无文献明确说明其标准化是每个时期单独进行还是把不同时期的数据合在一起进行。本研究认为,将2000年、2010年和2015年3期指标值进行统一标准化是合理的,这样得到的不同时期的结果可以进行比较。例如,假设某指标两个时期的指标值分别在 $[10, 20]$ 和 $[80, 90]$ 上均匀分布,若将每一时期的数据单独标准化,标准化后两个时期的指标值一样,而两者的实际情况却相距甚远,因此每个时期单独标准化不宜进行时间维度上的比较。

5 结论

2000—2015年南阳市生态安全水平持续改善,且呈现出东南低、西北高的趋势,这与区域内生态环境状况变化、生态工程建设力度、快速城镇化等多种自然和人为因素密切相关。随着人们生态环境保护意识的不断增强,生态保护措施实施力度不断加大,生态压力对南阳市生态安全水平的贡献程度被生态响应的贡献度所替代,促使生态安全状况不断向好。为了进一步提升区域生态安全水平,南阳市需要继续加强生态环境保护与治理力度,全面改善生态环境质量。

本研究基于栅格单元进行生态安全水平空间量化,能够更加准确地反映南阳市生态安全水平的区域差异,有助于精准实施生态环境保护治理工程措施。此外,在开展不同时间的评价时,为了便于评价结果在时间维度上可比,应该将不同时间的指标值统一进行标准化。

参考文献 (References):

- [1] 欧阳志云, 徐卫华, 肖焱, 郑华, 张路. 新世纪我国生态安全面临的新态势与对策. 智库理论与实践, 2016(06): 33-41.
- [2] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. 地理研究, 2010, 29(3): 383-396.
- [3] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004(04): 761-768.
- [4] Dabelko G D, Dabelko D D. Environmental security: Issues of conflict and redefinition. Environmental Change & Security Project Report, 1995, 1(1): 3-13.
- [5] Rogers K S. Ecological Security and multinational corporations. Environment Change & Security Project. Report, 1997, 1(3): 29-36. <http://wwics.si.edu/topics/pubs/report3a.pdf>
- [6] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [7] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 薛志雄. 生态安全研究进展. 生态学报, 2005(04): 861-868.
- [8] 吴柏海, 余琦殷, 林浩然. 生态安全的基本概念和理论体系. 林业经济, 2016, 38(07): 19-26.
- [9] Asgarian A, Amiri B J, Sakieh Y. Assessing the effect of green cover spatial patterns on urban land surface temperature using landscape metrics approach. Urban Ecosystems, 2015, 18(1): 209-22.
- [10] 侯鹏, 王桥, 申文明, 翟俊, 刘慧明, 杨旻. 生态系统综合评估研究进展: 内涵、框架与挑战. 地理研究, 2015, 34(10): 1809-1823.
- [11] Li Y F, Sun X, Zhu X D, Cao H H. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China. Ecological Modelling, 2010, 221(19): 2251-2260.
- [12] 丁丁, 谷雨. 我国生态安全的现状和对策. 环境保护, 2010(02): 38-40.
- [13] 张琨, 林乃峰, 徐德琳, 于丹丹, 邹长新. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1057-1063.
- [14] 宋子奇, 方国华, 闻昕, 陈学义. 基于能值分析的跨流域引调水工程生态效益计算. 水资源与水工程学报, 2020, 31(05): 56-61.
- [15] 张杰平. 跨流域调水补偿制度创新研究[D]; 武汉: 武汉大学, 2012.
- [16] 李浩, 黄薇, 刘陶, 彭智敏. 跨流域调水生态补偿机制探讨. 自然资源学报, 2011, 26(09): 1506-1512.
- [17] 王泽琳, 张如良, 吴欢. 跨流域调水的公正问题——基于环境正义的分析视角. 中国环境管理, 2019, 11(02): 101-105.
- [18] 李璐, 史志华, 朱惇, 蔡崇法. 南水北调中线水源区森林覆盖变化及其影响因子分析. 自然资源学报, 2009, 24(06): 1049-1057.
- [19] 庞振凌, 常红军, 李玉英, 张乃群, 杜瑞卿, 胡兰群. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价. 生态学报, 2008(04): 1810-1819.
- [20] 施建伟, 尹延震, 王苗, 邓李玲, 黄进, 陈海燕, 杜宗明, 张毅华, 李玉英. 南水北调中线工程调水前后丹江库区水质分析. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(02): 103-109.
- [21] 乔卫芳, 赵同谦, 邵超. 丹江口水库河南汇水区土地利用景观格局分析. 河南理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(03): 350-356.
- [22] 方国华, 周磊, 闻昕, 薛刘宇, 严春华. 南水北调东线江苏受水区土地利用变化模拟及生态安全评价. 国土资源遥感, 2017, 29(03): 163-170.
- [23] 张雁, 李占斌, 刘建林. 南水北调中线商洛水源地生态安全评价. 人民长江, 2016, 47(19): 32-36.
- [24] 周晨, 李国平. 流域生态补偿的支付意愿及影响因素——以南水北调中线工程受水区郑州市为例. 经济地理, 2015, 35(06): 38-46.
- [25] 白景峰. 跨流域调水水源地生态补偿测算与分配研究——以南水北调中线河南水源区为例. 经济地理, 2010, 30(04): 657-661+687.
- [26] 蔡邦成, 陆根法, 宋莉娟, 刘庄. 生态建设补偿的定量标准——以南水北调东线水源地保护区一期生态建设工程为例[J]. 生态学报, 2008(05): 2413-2416.
- [27] 彭哲, 郭宇, 郝仕龙, 侯梅芳. 丹江口库区生态安全的时空演变规律及其调控措施. 水土保持通报, 2019, 39(01): 212-219.
- [28] 朱九龙. 基于 PSR 模型的南水北调中线工程水源区土地生态安全评价——以南阳市为例. 工业安全与环保, 2015, 41(12): 73-75+86.
- [29] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 陈俊羊, 赵俊峰. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. 数学的实践与认识, 2012, 42(07): 93-100.
- [30] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
- [31] 李永格, 李宗省, 冯起, 卫伟, 杨静, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究. 生态学报, 2019, 39(07): 2343-2352.
- [32] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 许君利. 近 50 年来祁连山冰川变化——基于中国第一、二次冰川编目数据. 地理学报, 2015, 70(09): 1402-1414.
- [33] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 22-25.
- [34] 张传国, 方创琳, 全华. 干旱区绿洲承载力研究的全新审视与展望. 资源科学, 2002(02): 42-48.
- [35] 常秋玲. 南水北调中线水源区(南阳市)生态环境综合研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- [36] 祁秉宇. 南水北调中线工程水源地河南段水质安全评价[D]. 北京: 华北水利水电大学, 2017.