



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.012

郭恒亮, 刘如意, 赫晓慧, 等. 基于 PSR 模型的南水北调中线主干渠沿线区域生态环境评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 65-70, 135. GUO Heng liang, LIU Ru yi, HE Xiao hui, et al. Eco environmental evaluation of Middle Route of South to North Transfer Project Based on PSR model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 65-70, 135. (in Chinese)

基于 PSR 模型的南水北调中线主干渠 沿线区域生态环境评价

郭恒亮, 刘如意, 赫晓慧, 田智慧

(郑州大学 水利与环境学院, 郑州, 450001)

摘要: 结合生态环境状况指数和修正后的“压力-状态-响应”(PSR)模型,从环境质量状况以及生态安全两个角度出发,分别考虑自然影响以及自然、经济、社会三者的协同作用,构建了适用于描述南水北调中线主干渠沿线地区生态环境状况的综合评价指标体系。研究表明:评价期内环境质量状况评价等级中,只有鲁山县处于“良”,安阳市“较差”,其他县区均为“一般”;生态安全评价方面,只有淅川县处于较安全状态,其他处于预警和中度预警状态,占研究区总面积的97.54%,中度预警占16.28%。总的来看,2014年研究区生态环境质量整体水平一般,综合生态安全形势不容乐观,需要政府部门加大对主干渠沿线输水地段人类活动的监管力度。

关键词: PSR 模型;南水北调中线地区;生态环境

中图分类号: XB21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0065-06

Eco environmental evaluation of Middle Route of South to North Transfer Project Based on PSR model

GUO Heng liang, LIU Ru yi, HE Xiao hui, TIAN Zhi hui

(Zhengzhou University, College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the ecological index and modified press state response model and beginning with environmental quality and ecological security, this paper has successfully constructed the synthetic evaluation index system which can be used to evaluate the eco environmental situation in areas along the main canal of Middle Route of South to North Transfer Project after respectively considering the natural influence and the combined influence of nature, economy and society. The results indicated that in the assessment of environmental quality levels during the entire evaluation, only the Lushan County was "better" and Anyang City was "worse" with others in the ordinary levels. Besides, in the ecological security Assessment, Xichuan County was the only one in relatively secure state while 97.54 percent of all the study area was in the early or moderate warning states with the moderate warning areas accounting for 16.28%. As a whole, eco environment quality in 2004 was generally in an ordinary level, and ecological security situation was worrying, so the government should improve? supervision to limit human activities in the study area.

Key words: PSR model; Middle Route of SNWTP; ecological environment

生态环境是一个自然-社会-经济的复合系统,同时,生态环境又是社会经济可持续发展的核心和

基础,对其质量评价能较好的反映区域社会经济可持续发展的能力以及社会生产和人居环境稳定可协

收稿日期: 2016-05-26 修回日期: 2016-08-10 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(142102310308; 152102210044); 河南省基础与前沿技术研究计划项目(142300410064)

Funds: Henan Province Science and Technology Research Program (142102310308; 152102210044); Basic and Frontier Technology Research Program of Henan Province(142300410064)

作者简介: 郭恒亮(1971-),男,河南商丘人,副教授,主要从事水利遥感与智慧城市方面研究。E-mail: guohengliang@zzu.edu.cn

通讯作者: 赫晓慧(1978-),女,河南商丘人,副教授,博士,主要从事水利遥感、地理信息及水生态方面的研究。E-mail: hexh@zzu.edu.cn

调的程度。南水北调中线主干渠是缓解黄淮海平原水资源严重短缺、优化配置水资源的重大战略性基础设施中的重要一环,其沿线区域生态环境的好坏对沿线输水安全具有重大的影响^[1]。

如今区域生态环境评估研究往往以定量评价为主。定量评价属于综合评价,往往采用一定的公式和模型进行描述^[2]。目前国内外生态评价模型框架有PSR模型(压力-状态-响应)、DSR模型(驱动力-状态-响应)、DPSEEA模型(驱动力-压力-状态-暴露-影响-响应)以及欧洲环境署提出的DPSIR模型等,所有模型均将人类活动的影响以及预防措施考虑在内。其中,PSR模型将社会经济与环境有机统一的结合在一起,与其他模型相比能够更加精确地反映生态安全评价中自然和人类活动之间的关系。目前,国内许多学者运用PSR模型在各种区域尺度上进行了相关的生态环境研究,并取得了较好的评价效果^[3-6]。然而,在对南水北调中线工程生态环境评估的众多研究中,多数研究集中在水源区^[7-9],而对该工程沿线生态环境研究的文章相对欠缺^[10-12]。因此本文结合生态环境现状评价体系,基于修正后的PSR模型,构建12个可量化指标,尝试应用于大型工程施工沿线区域的生态环境评估,分别从环境质量状况以及生态安全两个角度分析出发,对2014年南水北调中线主干渠沿线河南段4 km缓冲区区域生态环境进行分析对比。

1 研究区概况

南水北调中线工程河南段总干渠全长731 km,占总干渠全长的36%。研究区为主干渠沿线4 km缓冲区范围(图1红色部分),在河南省境内主要经过27个县市,经纬度范围为32.63°N-36.27°N,

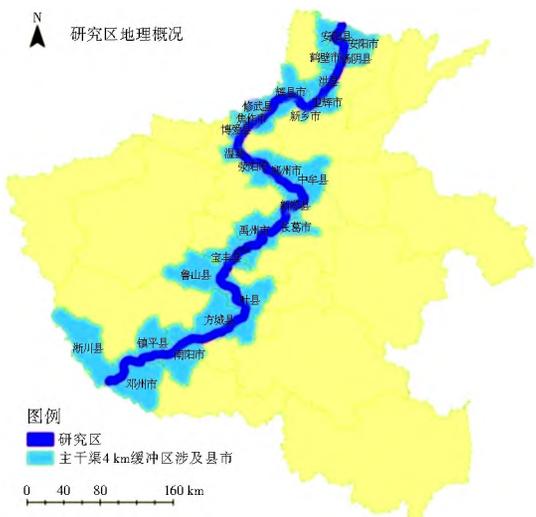


图1 研究区地理位置

Fig. 1 The location of study area

111.65°E-114.38°E, 区域面积5 930 km², 约占河南省总面积的3.55%。研究区沿线地质条件复杂,具有不同的水生态特征,降雨分布不均,自然、经济、社会情况差异较大。同时,研究区内生态环境承载能力与社会经济发展脱节,土地过度开发、水体严重污染、地下水持续下降等问题突出,区域的可持续发展受到极大地限制。

2 资料

根据模型指数构建需要,除了研究区矢量边界图以及河南省行政边界图等辅助数据外,评价所需的主要基础数据包括评价区2014年的土地利用、植被覆被、土壤侵蚀以及相关的社会经济统计等数据,矢量和栅格数据均使用统一的投影与坐标系统,主要基础数据见表1。其中,土地利用数据由人工目视解译获取,误差矩阵检验精度达90%以上,见图2。

表1 基础数据

Tab. 1 The basic data

数据类型	来源	分辨率/比例尺
土地利用覆被图(2014年)	2014年高分一号解译	8 m
MOD1301陆地2级数据16天合成产品	goddard space flight center 网站	250 m
2015年河南省统计年鉴	河南省统计局	
2015年各市统计年鉴	各市统计局	
全国2010年人口普查分县数据	黄河下游科学数据共享平台	
中国土壤侵蚀强度等级图(1997-2000年)	黄土高原科学数据共享平台	1:100000

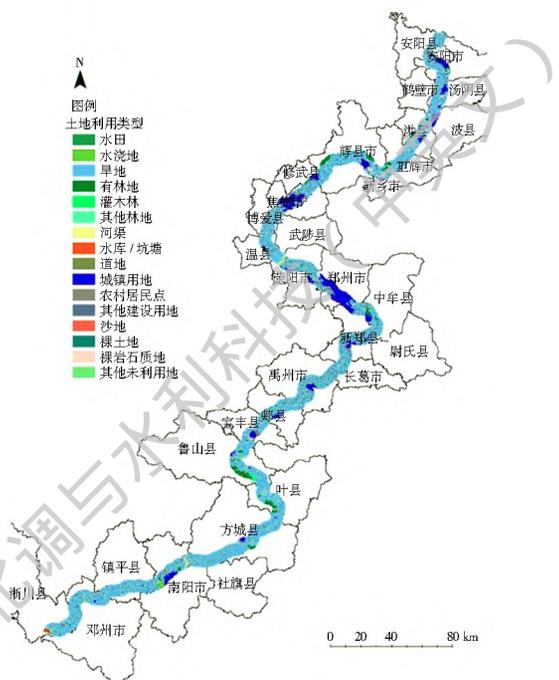


图2 研究区土地利用覆被

Fig. 2 The land use and cover in the study area

NDVI 为 2014 年 5 月- 9 月 MOD13Q1 每 16 天合成数据产品, 共 10 景影像, 利用 MRT 工具进行数据格式及投影转换, 然后结合 ArcGIS 栅格计算功能获取五个月象元 NDVI 最大值的均值分布图, 结果见图 3。

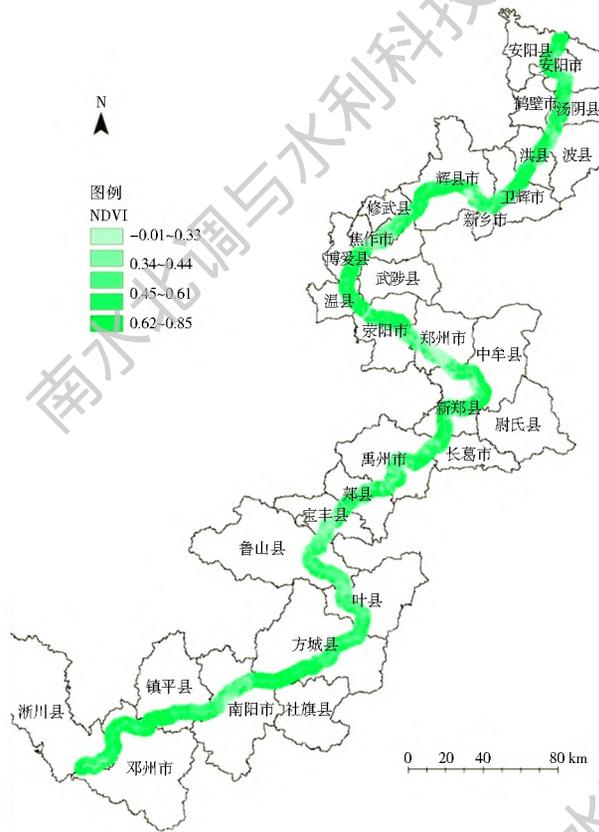


图 3 研究区 NDVI 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI in the study area

3 方法

评价从环境质量状况和生态安全两个角度分析, 二者的定量描述分别由生态环境状况指数和修正后的 PSR 模型计算结果即综合生态安全指数确定。生态环境状况指数主要侧重表达自然环境的影响, 而综合生态安全指数包含了自然、经济和社会的协同作用。

3.1 生态环境状况指数

生态环境状况指数(EI)是一个综合指数, 由 5 个可度量指标构成, 其计算公式如下:

$$EI = 0.35 \times \text{生物丰度指数} + 0.25 \times \text{植被覆盖指数} + 0.15 \times \text{水网密度指数} + 0.15 \times (100 - \text{土地胁迫指数}) + 0.10 \times (100 - \text{污染负荷指数}) \quad (1)$$

其中: 生物丰富指数 = $A_{bio} \times (0.35 \times \text{林地} + 0.21 \times \text{草地} + 0.28 \times \text{水域湿地} + 0.11 \times \text{耕地} + 0.04 \times \text{建设用地} + 0.01 \times \text{未利用地}) / \text{区域面积}$ (2)

式中: A_{bio} 取 511.264 2

$$\text{植被覆盖指数} = NDVI_{\text{区域均值}} = A_{veg} \times \left(\frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \right) \quad (3)$$

式中: p_i 为 5 月- 9 月象元 NDVI 最大值的均值; n 为区域象元数; A_{veg} 取 0.0121。

$$\text{水网密度指数} = (A_{riv} \times \text{河流长度} + A_{lak} \times \text{水域面积} + A_{res} \times \text{水资源量}) / \text{区域面积} / 3 \quad (4)$$

式中: A_{riv} 、 A_{lak} 、 A_{res} 分别取 84.370 4、591.790 9、86.387 0。

$$\text{土地胁迫指数} = A_{ero} \times (0.4 \times \text{重度侵蚀面积} + 0.2 \times \text{中度侵蚀面积} + 0.2 \times \text{建设用地面积} + 0.2 \times \text{其他土地胁迫}) / \text{区域面积} \quad (5)$$

式中: A_{ero} 取 236.043 6

$$\text{污染负荷指数} = 0.20 \times (A_{COD} \times \text{COD 排放量} + A_{NH3} \times \text{氨氮排放量}) / \text{区域年降水总量} + (0.20 \times A_{SO2} \times \text{SO}_2 \text{ 排放量} + 0.10 \times A_{VFC} \times \text{烟(粉)尘排放量} + 0.20 \times A_{NOX} \times \text{氮氧化物排放量} + 0.10 \times A_{SOL} \times \text{固体废物丢弃量}) / \text{区域面积} \quad (6)$$

其中 A_{COD} 、 A_{NH3} 、 A_{SO2} 、 A_{VFC} 、 A_{NOX} 、 A_{SOL} 分别取 4.393 7、40.176 5、0.064 9、4.090 4、0.510 3、0.075 0

分指数详细计算方法见参考文献[13]。五个分指数可分别反映被评价区生物的丰贫、植被覆被的高低、水的丰富程度、遭受的胁迫大小, 承载的污染物压力。

根据 EI 指数大小, 将各县市生态环境分为 5 级, 即优、良、一般、较差和差, 分级标准见表 2。

表 2 生态环境状况分级

Tab. 2 Levels of ecological environment status

指数范围	$EI \geq 75$	$55 \leq EI < 75$	$35 \leq EI < 55$	$20 \leq EI < 35$	$EI < 20$
级别	优	良	一般	较差	差

3.2 修正 PSR 模型

3.2.1 模型体系框架

生态安全评价需要根据研究区实际情况来构建评价指标体系, 本研究引入了应用广泛且认可度更高的修正 PSR 模型。综合自然与社会经济等方面的影响因子, 结合模型概念框架以及研究区实际情况, 在相关研究的基础上^[14,16], 构件了修正 PSR 模型评价体系框架, 见表 3。该体系包括目标层、准则层和指标层三层。准则层中自然人文压力反映了自然资源、生态环境和人文社会压力等方面的因素, 生态系统状态包括土壤、植被、社会经济等多种因素, 响应则体现了系统对土地利用变化所引发的各种环境问题的反应和解决能力。评价最终落脚在指标层, 由 8 个可以度量的指标组成, 其中生态环境现状由五个分指标构成, 具体见上文生态环境状况指数描述。

文章采用层次分析法, 结合专家调查的方法, 分

析对比各个评价指标的重要性,构造对比判断矩阵,计算权矩阵并做一致性检验,最终确定指标权重。

表3 修正PSR模型体系框架

Tab. 3 System structure for modified PSR model

目标层	准则层	指标层	权重	标准值	参考标准
生态安全评价指标体系	自然人文压力	人口密度(-)	0.378 0	142	中国国家统计局
		人口自然增长率(-)	0.114 0	5.21	大气污染物排放标准
	生态系统状态	人均消费额(-)	0.048 0	1.45	环境标准 HJ192- 2015
		SO ₂ 排放量(-)	0.060 0	13.14	2013 环保部标准
		生态环境现状(+)	0.130 0	≥35	2008 年生态市标准
	社会和土地生态响应	污染源排放达标率(+)	0.091 8	≥85.4	中国国家统计局
		主要污染物排放强度(-)	0.078 3	< 5.0	中国国家统计局
		人均 GDP (+)	0.099 9	46 629	中国国家统计局

表中的“+”表示正向安全趋势指标,“-”表示负向安全趋势指标。

3.2.2 归一化处理

根据评价标准值,将评价指标进行归一化处理,换算成以百分比为单位的指标值。计算模型如下:

正向安全趋势指标:当 $X_i \geq Y_i$,则 $P_i = 1$;当 $X_i < Y_i$,则 $P_i = X_i/Y_i \times 100\%$ 。

负向安全趋势指标:当 $X_i \leq Y_i$,则 $P_i = 1$;当 $X_i > Y_i$,则 $P_i = Y_i/X_i \times 100\%$ 。

式中: X_i 表示第*i*个评价指标的实际值; Y_i 表示第*i*个评价指标的标准值; P_i 表示计算后第*i*个评价指标的安全指数($0 \leq P_i \leq 1$)。

3.2.3 综合生态安全指数

采用指数和法对单项指标进行加权求和综合计

算,可以得到生态环境安全综合指数模型。其表达式为:

$$ES_i = \sum_1^n (p_i \times w_i) \quad (7)$$

式中: ES_i 表示综合生态安全值; P_i 表示单项指标的生态安全指数(n 为指标个数); W_i 表示单项指标权重。

本文采用级差标准化的方法将综合生态安全值转换为等级值,建立评判集(即等级值)与标准化值(即指数值)之间的概念关联。根据相关区域生态安全综合评判标准^[17-18],本文安全标准共分5个级别(见表4)。

表4 生态安全综合评价标准

Tab. 4 Comprehensive evaluation criterion for ecological safety

指数范围	$ES < 0.45$	$0.45 \leq ES < 0.65$	$0.65 \leq ES < 0.75$	$0.75 \leq ES < 0.9$	$ES \geq 0.9$
级别	重警状态	中警状态	预警状态	较安全状态	安全状态

4 结果与分析

4.1 环境质量现状分析

经过指标计算,通过 ArcGIS 制图,获得生态环境状况指数统计图以及分指数加权后正向贡献值统计图,见图4和图5。根据图4以及生态环境质量评价等级标准,沿线的27个县市中,只有鲁山县为“良”,安阳市处于“较差”,其他处于“一般”,对应面

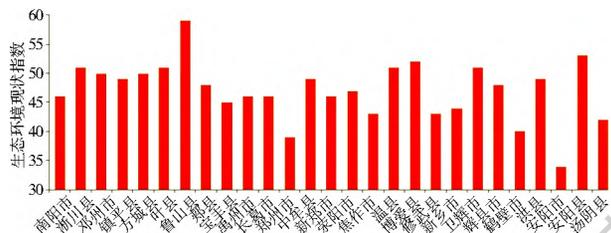


图4 研究区生态环境现状指数

Fig. 4 Ecological environment status index of the study area

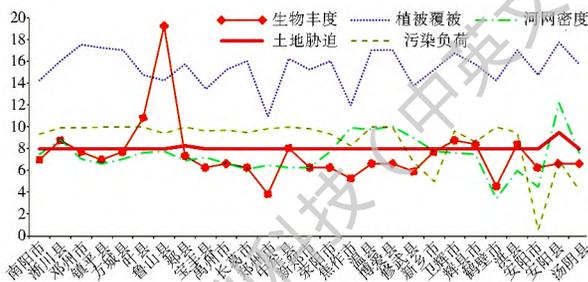


图5 生态环境现状指数分指数正向加权贡献值

Fig. 5 Weighted contribution value of each index in the composition of Ecological environment status index

积比例依次为 5.80%、3.54% 和 90.66%。

分析图5发现,生态环境状况排名靠前的地区,如鲁山县、安阳县、博爱县以及淅川县,林地覆盖率高,水系发达,自然基础条件优越。尤其是处于“良”的鲁山县,在多年退耕还林政策的影响下该县森林覆被率超过50%,使得该县生物丰度贡献值最高。

相比而言,鹤壁市、郑州市以及安阳市多项分指标均不理想,郑州市植被覆被和生物丰度最低,而安阳市污染负荷压力最重,自然环境压力较大。整体来看,研究区环境质量状况处于一般水平,区域已经处于较为敏感阶段,部分地区土地退化、污染超标等情况凸显,这些制约性因子将不利于水源的保护工作。

4.2 生态安全评价分析

研究区生态安全值范围在 0.52~0.81 之间,见图 6。根据面积统计和图 8 可知,研究区安全等级分布在较安全和中度预警之间。淅川县的 145.71 km² 区域处于较安全状况,占研究区的 2.46%,而 81.26% 的研究区面积处于预警状态。值得注意的是,评价区域内的中度预警状态县市一共八个,占县市总数的三分之一,占总面积的 16.28%,其中安全度最差的是安阳市、郑州市、焦作市,生态安全值分别为 0.52, 0.58 和 0.60,形势不容乐观。

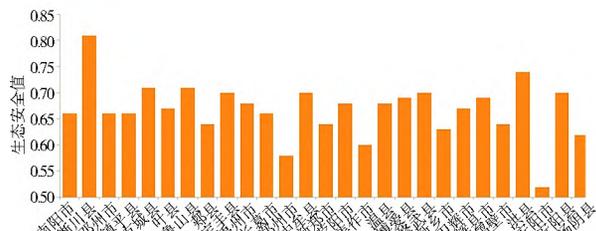


图 6 研究区生态安全值

Fig. 6 comprehensive value of ecological security of the study area

从“压力”、“状态”和“响应”三个角度出发分析,见图 7,自然人文压力指数差异较大,从三者的权重分配以及贡献值分布情况对比来看,该指数在生态安全评价中的影响也最大。安全度最高的淅川县,其自然人文压力贡献值高达 0.45,主要原因在于该县在 2009 年-2011 年间移民 16.2 万人,并大规模绿化种植和关停污染企业。而安阳市、郑州市以及焦作市地区城市化发展迅速,人口密集,消费水平较高,工业集聚,人口压力明显。尤其是安阳市环境污染特别突出,重污染天气和河流水质超标严重,环境保护工作面临着极大的困难和挑战。

值得注意的是,各个县市生态状态的差异很小,根据环境评价的结果可知,由于研究区沿线各县市生态环境指数几乎全部满足生态环境标准,即使是最差的安阳市环境指数也接近标准值,使得归一化加权后的生态状态贡献值相同。

与自然人文压力相比,生态响应方面,虽然市级区域指数值相对较高,如郑州市明显高于淅川县,但各个县市差距并不大。分析原因,生态差异取决于主要污染物排放强度值和人均 GDP 大小,虽然市区较县级区域经济发达,人均 GDP 高于县级区

域,但工业密集,污染严重,使得主要污染物排放强度高,从而导致了该指数在县域和市域范围之间的较小差异。

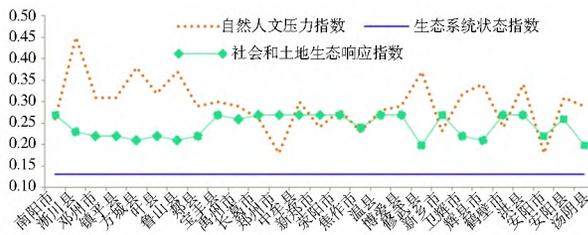


图 7 生态安全分指数正向加权贡献值

Fig. 7 Weighted contribution value of each index in the composition of ecological security



图 8 评价区生态安全等级空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of levels in ecological security assessment for each county

结合生态安全分指标贡献值结果,通过安全等级空间位置差异对比发现(图 8),在八个分指标中,生态安全等级与人口密度有着较高的一致性,处于中度预警以上的地区均为人口密度较高的地区,分析可知,这些地区全部位于主干渠中游和下游地区,以中游地区最为集中,这些地区具有较为突出的经济发展定位,部分地区属于河南省经济的核心地带,而上游在整个研究区中经济发展薄弱,从而造成了区域上人口密度较大的差异。另外,主干渠所经过的城市中心区域生态安全值明显较低,如:郑州市(0.58)低于新郑(0.64),荥阳(0.68),中牟(0.70);焦作市(0.60)低于淇县(0.74),博爱县(0.69),修武县(0.70)。对于城市化发展较快的地区,生态安全

指数反而越低,充分暴露了我国部分城市城市化建设的负面效应,这将对水源保护工作产生较大的影响。因此,对于流经此处的主干渠,政府需要有针对性地开展水源保护工作。

5 结论

本研究主要基于修正后的PSR模型,分别从生态环境质量状况和生态环境安全两个角度综合全面了对南水北调中线工程沿线区域的生态环境评价做了详细的探讨。评价结果较好地反映了自然以及自然、社会、经济三者对于研究区生态环境的影响现状,说明了评价模型体系运用于大型工程沿线生态评估的可用性,为南水北调中线输水环境的调查提供了行之有效的科学依据。

整体上,研究区生态环境状况并不乐观。相关政府部门应该加大对沿线生态环境的治理和保护,采取节水、调水、治污三项措施同步实施策略,为维护和稳定南水北调中线工程水源优良水质创造良好的自然条件和坚实的生态基础。

限于数据获取的限制,本文只针对研究区一期的生态环境做了详细的评价分析。为了更好地揭示南水北调主干渠沿线生态环境的变化趋势和规律,还需要结合多年的数据做进一步的深入研究。

参考文献(References):

- [1] 李善同,许新宜.南水北调与中国发展[M].北京:经济科学出版社,2004.(LI Shan tong, XU Xin yi. South to North Water Transfer Project and development of China[M]. Beijing: Economic Science Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 刘红,王慧,张兴卫.生态安全评价研究述评[J].生态学杂志,2006(1):74-78.(LIU Hong, WANG Hui, ZHANG Xing wei. Research review on ecological security assessment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006(1): 74-78. (in Chinese)) DOI: 10.13292/j.1000-4890.2006.0015
- [3] 杨一鹏,蒋卫国,何福红.基于PSR模型的松嫩平原西部湿地生态环境评价[J].生态环境,2004(4):597-600.(YANG Yi peng, JIANG Wei guo, HE Fu hong. Assessment of wetland eco environment in western Songnen plain based on PRS model[J]. Ecology and Environment, 2004(4): 597-600. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2004.04.037
- [4] Pei H, Fang S, Lin L, et al. Methods and applications for ecological vulnerability evaluation in a hyper arid oasis: a case study of the Turpan Oasis, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 1449-1461. DOI: 10.1007/s12665-015-4134-z
- [5] 吴克宁,关小克,冯新伟,等.基于PSR模型的郑州市生态环境质量灰色预警[J].河南农业科学,2007(6):83-85,89.(WU Ke ning, GUAN Xiao ke, FENG Xin wei, et al. The ecological environment quality warning of Zhengzhou using Gray System based on the PSR model[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2007(6): 83-85, 89. (in Chinese)) doi: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2007.06.025
- [6] 丁彩霞,延军平.基于PSR模型的宁夏地区生态环境变化特征研究[J].水土保持通报,2015(3):191-196.(DING Caixia, YAN Jun pin. Research on eco environmental evolution characteristics in Ningxia hui autonomous region based on PSR model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015(3): 191-196. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.041
- [7] 王晓峰,张晖,董小平,等.南水北调中线工程陕西水源区生态环境质量综合评价[J].水土保持通报,2010(3):230-232,236,242.(WANG Xiao feng, ZHANG Hui, DONG Xiao ping, et al. Comprehensive eco environmental evaluation of Shaanxi water source area in Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010(3): 230-232, 236, 242. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2010.03.019
- [8] 王立辉,黄进良,杜耘.南水北调中线丹江口库区生态环境质量评价[J].长江流域资源与环境,2011(2):161-166.(WANG Li hui, HUANG Jin liang, DU Yun. Eco environmental evaluation of Middle Route of the South to North water Transfer Project[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011(2): 161-166. (in Chinese))
- [9] 刘远书,高文文,侯坤,等.南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J].长江流域资源与环境,2015(3):440-446.(LIU Yuan shu, GAO Wen wen, HOU Kun, et al. Analysis of ecological environment change on watershed of the Middle Route of South North Water Diversion Project[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015(3): 440-446. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201503013
- [10] 郭恒亮,韦原原,楠晓慧,等.南水北调中线地区土地利用变化及生态环境效应[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):444-447.(GUO Heng liang, WEI Yuan yuan, HE Xiao hui, et al. Land use change and its eco environmental effects analysis of Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 444-447. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.03.010
- [11] 窦明,左其亭,胡彩虹.南水北调工程的生态环境影响评价研究[J].郑州大学学报:工学版,2005(2):63-66.(DOU Ming, ZUO Qi ting, HU Cai hong. Assessment of influence of Water Transfer Project from South to North on ecological environment[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2005(2): 63-66. (in Chinese))
- [12] 张璐,杨爱民,吴赛男,等.南水北调中线一期工程对受水区城市绿地产生的生态环境效益研究[J].水利水电技术,2010(4):4-7,23.(ZHANG Lu, YANG Ai min, WU Sai nan, et al. Study on eco environmental benefit of urban green space within water receiving areas from phase I of Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010(4): 4-7, 23. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2010.04.009
- [13] HJ 192-2015. 中华人民共和国国家环境保护标准[S]. (HJ

- 192-2015. The state environmental protection standards of the People's Republic of China[S]. (in Chinese))
- [14] Walz R. Development of environmental indicator systems: experiences from Germany [J]. Environmental Management, 2000, 25(6): 613-623. DOI: 10.1007/s002670010048
- [15] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究[J]. 土壤, 2003(1): 2-7. (ZUO Wei, ZHOU Huizhen, WANG Qiao. Conceptual framework for selection of an indicator system for assessment of regional ecological safety [J]. Soils, 2003(1): 2-7. (in Chinese)) DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2003.01.002
- [16] 彭建, 吴健生, 潘雅婧, 韩忆楠. 基于 PSR 模型的区域生态可持续性评价概念框架[J]. 地理科学进展, 2012(7): 933-940. (PENG Jian, WU Jian sheng, PAN Yajing, et al. Evaluation for regional ecological sustainability based on PSR model: conceptual framework[J]. Progress in Geography, 2012(7): 933-940. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.002
- [17] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报, 2013(16): 5090-5100. (ZHANG Rui, ZHENG Hua wei, LIU You zhao. Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013(16): 5090-5100. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201209191319
- [18] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究, 2002(1): 67-71. (ZUO Wei, WANG Qiao, WANG Wen jie, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard[J]. Geography and Territorial Research, 2002(1): 67-71. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2002.01.017