

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0115

方炫,曹建军. 江苏南水北调供水区水质驱动因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 100-107. FANG X, CAO J J. Analysis of driving factors for water quality in water supply area of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 100-107. (in Chinese)

江苏南水北调供水区水质驱动因素分析

方炫^{1,2}, 曹建军¹

(1. 南京晓庄学院 环境科学学院, 南京 210017; 2. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023)

摘要:为确定影响江苏南水北调供水区水质的关键因素,开展江苏南水北调供水区的水质驱动力研究。立足江苏南水北调区域特点,针对水质污染治理成效,从经济社会发展水平、产业发展规模、水资源承载能力、典型污染物排放规模、水污染治理投资、生态环境政策6个方面选择驱动因素,建立24个自变量表征指标系。运用Step-Wise回归分析方法,得出水质驱动因素最优回归方程,结果表明:生活服务业用水量和COD区域排放量对水质影响最显著;在正向驱动因素中灌溉渠系水利用率及区域水污染治理投资对水质的影响最大。据此提出针对性水质改善对策建议,包括:分类量化污染排放当量及其长效管理责任,“倒逼”地方政府加大水污染治理投资;通过提高水价促进农业节水,减少农业污染物的携带性排放;优化水污染管制政策,严禁生活服务业污水直接排放;强化河道内源治理,控制淤积性污染扩散等。

关键词:水质;驱动因素;Step-Wise回归分析;江苏南水北调

中图分类号:X824 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of driving factors for water quality in water supply area of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province

FANG Xuan^{1,2}, CAO Jianjun¹

(1. College of Environmental Sciences, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 210017, China;

2. College of Geographic Sciences, Nanjing normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to determine the key factors affecting the water quality of the water supply area of the South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province, the water quality driving forces of the water supply area of the South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province were studied. Based on the regional characteristics of the South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province, and in view of the effectiveness of water pollution control, the level of economic and social development, the scale of industrial development, the carrying capacity of water resources, the scale of typical pollutants discharge, the investment in water pollution control and the policy of ecological environment were considered and 24 independent variable characterization indexes were established. Based on step-wise regression analysis method, the optimal regression equation of water quality driving factors showed that water consumption in domestic service industry and COD regional discharge had the most significant impact on water quality. Likewise, water use efficiency in irrigation canal system and investment in regional water pollution control among the positive driving factors had the greatest impact on water quality. Moreover, targeted water quality improvement measures were proposed to classify and quantify the pollutant discharge equivalent and its long-term management responsibility for forcing local governments to increase investment in water pollution

收稿日期: 2019-03-25 修回日期: 2019-05-18 网络出版时间: 2019-05-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190523.1618.018.html>

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20161118); 国家自然科学基金(41871313)

作者简介: 方炫(1982—), 女, 江苏沭阳人, 副教授, 主要从事景观变化及其生态环境效应研究。E-mail: fangxuan1982@163.com

通信作者: 曹建军(1976—), 男, 陕西黄陵人, 副教授, 主要从事生态环境遥感、数字地形分析研究。E-mail: jjuncaol@163.com

control. In addition, to promote the agricultural water saving by raising water prices for reducing the agricultural pollutants discharge; to optimize water pollution control policies that strictly prohibited the direct discharge of sewage from domestic service industry; and to strengthen internal source governance for controlling siltation pollution diffusion were also suggested.

Key words: water quality; driving factors; Step-Wise regression analysis; South-to-North Water Transfer of Jiangsu Province

南水北调东线工程是水资源跨流域配置的特大型综合性水利工程,其主要目标是供水,兼顾防洪、除涝、航运、生态补水等功能。南水北调东线一期工程江苏段(简称江苏南水北调供水区)是在江苏“江水北调”工程基础上,通过改建、扩建、新建等工程措施,扩大供水规模,实现向北跨省域行政区供水。截止2018年,南水北调东线工程累计抽引长江水量164.66亿 m^3 ,调水入山东省30.69亿 m^3 。配套建设的截污导流工程对于减少点源污染排放,提升输水沿线河湖水体纳污能力发挥了重要作用。但由于江苏南水北调供水区既是水源地、输水区,又是受水区^[1],受线型长廊道输水的面源污染影响,以及季节性水量减少引致纳污能力的降低,区域性水质全面达标仍然存在差距。相关研究表明,江苏南水北调供水区非汛期农业用水区水质达标率为57.1%,景观娱乐用水区水质达标率仅为14.3%^[2];非汛期重点河段的徐州房亭河、宿迁徐洪河、淮安盐河等监测点断面水质为Ⅳ—Ⅴ类,超标项目为 NH_3-N (氨氮,mg/L)、COD(化学需氧量,mg/L)^[3]。开展水质驱动因素研究,确定影响水质的关键要素,对于推进江苏南水北调供水区水环境科学治理、长效保护具有应用价值。

水质变化驱动力的定量研究可为水环境改善和水资源综合管理提供可靠依据。纵观国内外水质驱动力研究成果,在分析水质驱动因子与水质关系问题上,采用的方法有灰度关联方法^[4-5]、回归模型方法^[6]、因果关系方法^[7]、协调度模型方法^[8]等。随着水环境遥感观测技术的进步和GIS空间分析技术的广泛应用,水质空间分布信息弥补水质驱动力研究中时间序列数据缺失的不足,且在水质空间变化驱动力研究中发挥优势^[9-10]。已有研究表明,人口^[11]、经济发展水平^[12]、环境政策^[4]、土地利用方式变化^[13]等因素均可影响水质的变化。我国太湖、鄱阳湖、滇池、抚仙湖、黄浦江、湘江、海河等诸多流域水系的水质驱动力均得到了研究^[5-6,8,11-12,14-16]。水质驱动力问题在人工湖泊^[17]、地下水^[18]方面也有探讨。不同水体水质驱动力研究表明,由于自然环境、经济社会以及人类活动的状况不同,影响水质变化的主要驱动因素不同。江苏南水北调供水区已开展水质变化趋势分

析、水污染防治对策等方面研究^[19-22],然而水质驱动力尚未得到定量研究与深入认识。

本研究立足江苏南水北调区域特点,针对水质污染治理成效,构建水质驱动因素分析的指标体系,运用Step-Wise回归分析方法,通过定量分析水质驱动因素的历史数据,得出驱动因子与水质之间的量化关系,即水质驱动回归模型,分析和讨论影响江苏南水北调供水区水质的主要驱动要素,最后针对性地提出改善水质的措施。

1 水质驱动因素回归模型构建和分析方法

1.1 Step-Wise回归分析方法

Step-Wise回归分析是研究因变量(y)与多个自变量(x_i)之间相关关系的多元回归分析的一种特殊形式。其主要特点是剔除了不显著的自变量影响,将对因变量影响显著的自变量引入回归模型,得出“最优”回归方程^[23]。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_m x_m + \epsilon \quad (1)$$

式中: y 表示被解释变量(因变量); x_1, x_2, \dots, x_m 表示对 y 有影响的解释变量(自变量)。 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 是对应自变量 x_1, x_2, \dots, x_m 的相关系数; ϵ 是回归模型中的随机误差项。

1.2 变量的选择

1.2.1 被解释变量的选择依据

按照《南水北调东线治污规划》^[24]和《南水北调东线控制单元治污实施方案》要求,江苏南水北调14个考核控制断面,输水干线水质必须稳定达到地表水Ⅲ类水质^[25],并以14个控制断面的6个水质考核指标(溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮(NH_3-N)、五日生化需氧量(BOD_5)、石油类和挥发酚)的年均值浓度^[26],与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)的Ⅲ类水质标准值进行比较分析。

南水北调东线江苏段水污染防治现状及水质保证措施探讨^[27]、南水北调东线一期工程沿线历年水质变化分析^[20]、南水北调东线江苏段水质变化趋势分析^[21]、南水北调东线江苏段水污染防治成效研究^[22]等研究成果表明,相应分析年际的14个控制断面的水质考核指标均达到Ⅲ类水质标准,在相应

分析年度内的非汛期,氨氮、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量均有超标。由于化学需氧量未列入江苏南水北调水质监测指标,且五日生化需氧量指标对氨氮指标具有解释性和形成机理的融合性,因此使用五日生化需氧量(BOD₅)作为被解释变量表征江苏南水北调水质污染程度。

1.2.2 解释变量的选择依据

污染源排放强度和治理措施决定水质状况^[28]。污染源分为外源因素和内源因素,外源因素主要有农业生产污染物面源排放、生活污水点源排放以及工业废水的直接排放^[29];内源因素主要是植物性、矿物性等营养物质在水体的沉积,发生富营养化后而导致营养盐的释放;内源因素本质上是外源因素的前因后果。治理措施包括面源污染控制(规范农业功能分区、发展绿色农业等)、点源污水处理(提高污水处理率、提升污水处理技术等)、内源生态治理(实施截污导流、建设湿地保护区等)以及行政管制、公众监督等措施。

因此,影响水质的因素是多方面,选择江苏南水北调供水区水质驱动因素不仅要考虑用于定量分析的指标数据的可得性,更为重要的是依据驱动因素选择的分析指标,应具有较强的定量表征性和定量解释性,且体现建设与管理措施的约定性,才能作为回归模型的自变量(解释变量)。

1.2.3 解释变量一致性论证

(1)水污染治理政策论证。江苏南水北调供水区涵盖徐州、淮安、扬州、宿迁市全境以及泰州市区^[30];江苏南水北调建设与管理体制是省级法人机构垂直管理与省政府行政级次管理相结合。因此,分析区的水污染治理政策具有一致性。

(2)水污染治理措施论证。治理措施主要有工程措施和管理措施;实施截污导流等工程措施的投资规模与设计的减排当量是一致的,即投资强度具有匹配性;管理措施依据《江苏省南水北调工程沿线区域水污染防治管理办法》执行,在规范性文件的调控目标上具有一致性。

(3)污染源和扩散机理论证。分析区水污染源均来自工业、农业以及生活性排放污染,且供水沿线河湖水系相通,因此,污染源和污染扩散机理不仅具有一致性,而且具有区域的联系性。

1.2.4 驱动因素和指标选择

水质驱动因素包括经济社会发展水平、产业发展规模、水资源承载能力、典型污染物排放规模、水污染治理投资、生态环境政策等。为尽可能准确表

达以上因素对水质的驱动作用,选取 24 个分型(正向型和反向型)指标对上述因素进行定量表征。由于选取的驱动因素对水质变化的影响既有正面影响,也有负面影响,采用原始变量的负数或者倒数进行正向化处理,使模型更能吻合现实状况^[31]。形成的江苏南水北调水质驱动因素 Step-Wise 回归模型的解释变量及其相关指标见表 1。

1.3 分析变量指标数据的获取

江苏南水北调供水区全面实施治污时间为 2005 年^[33],至 2014 年底 102 项治污项目实施完成,治污后期实施的水质保护补充工程于 2016 年实施完成^[19]。因此,选取 2004—2017 年五日生化需氧量(BOD₅)年均浓度作为被解释变量;选取驱动因素涵盖的 24 个指标数据作为自变量,构建相应分析区的 Step-Wise 回归模型。由于江苏南水北调供水区涵盖徐州、淮安、扬州、宿迁市全境以及泰州市区,因此,以市级行政区 2004—2017 年的统计年鉴为主要数据源,匹配分析区经济社会存量状况,并结合指标特点获取指标数据;部分指标数据利用省市级水资源公报、环境状况公报获取。2004—2017 年解释变量和被解释变量相关数据统计分析结果见表 2。

2 水质驱动因素回归结果分析与讨论

2.1 驱动因素拟合及优度检验结果

借助 SPSS23.0 对上述数据进行 Step-Wise 回归分析,建立江苏南水北调供水区水质驱动因素预测模型,回归结果见表 3、4。

由于 R^2 会随着变量或观察次数 n 的增多而增大,使得 R^2 不能够完全表示回归方程的拟合优度。因此,引入调整后 R^2 ,其计算公式为

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{\sum(y - \bar{y})^2 / (n - m - 1)}{\sum(y - \bar{y})^2 / (n - 1)} \quad (2)$$

对模型进行检验可知,模型的决定系数 R^2 为 0.996, R^2 调整后为 0.994,模型的拟合优度高。通过对模型的 t 值与显著性 p 值检验可知,模型的显著性水平高。

综上所述,江苏南水北调供水区水质驱动因素的逐步多元回归模型通过了检验,模型可进行后续预测分析,回归方程形式为

$$y = 3.66 \times 10^{-5} x_{12} + 0.163 x_{18} + 1.59 \quad (3)$$

标准化后的回归方程为

$$y = 0.288 x_{12} + 0.713 x_{18} \quad (4)$$

仍然借助 SPSS23.0 对表 1 所列正向变量和因变量进行 Step-Wise 回归分析,回归结果见表 5、6。

表 1 江苏南水北调供水区水质驱动因素相关指标

Tab. 1 Driving factors of water quality in water supply area of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province

驱动因素	符号标示	指标名称	指标分型
经济社会发展水平	x_1	常住人口数量/万人	反向型指标
	x_2	城镇化率/%	反向型指标
	x_3	人均 GDP 占有量/万元	反向型指标
	x_4	GDP 增长率/%	反向型指标
工业发展规模	x_5	工业投资/亿元	反向型指标
	x_6	一般工业用水量/万 m^3	反向型指标
	x_7	万元 GDP 用水量/ m^3	反向型指标
农业发展规模	x_8	农业节水投资/亿元	正向型指标
	x_9	农业灌溉用水总量/万 m^3	反向型指标
	x_{10}	农业灌溉亩均用水量/ m^3	反向型指标
	x_{11}	灌溉渠系水利用率/%	正向型指标
生活服务业发展规模	x_{12}	生活服务业用水总量/万 m^3	反向型指标
	x_{13}	生活服务业用水价格/(元· m^3)	正向型指标
水资源承载能力	x_{14}	区域水资源利用总量/万 m^3	正向型指标
	x_{15}	区域人均水资源利用量/ m^3	正向型指标
	x_{16}	区域亩均水资源占有量/ m^3	正向型指标
	x_{17}	雨洪资源及其中水利用率/%	正向型指标
典型污染物排放规模	x_{18}	COD 区域排放量/万 t	反向型指标
	x_{19}	NH_3-N 区域排放量/万 t	反向型指标
水污染治理投资	x_{20}	区域水污染治理投资/亿元	正向型指标
	x_{21}	水污染治理投资占 GDP 比重/%	正向型指标
生态环境政策	x_{22}	城市绿化覆盖率/%	正向型指标
	x_{23}	乡村林木覆盖率/%	正向型指标
	x_{24}	河道生态用水保证率/%	正向型指标

注:①工业投资。统计口径的规模以上工业投资,不分所有制结构。②一般工业用水量。不包含电力工业等循环用水量。③农业节水投资。包括农田水利重点县、灌区节水改造、水土保持、土地整理、千亿斤粮产能工程、规模化高效节水等建设项目。④农业灌溉亩均用水量。指稻麦轮作或水稻、蔬菜区毛用水量,不包含林果作物灌溉用水量。⑤生活服务业用水价格。包括直接的成本水价及其代收的水资源费、污水处理费及其江苏南水北调基金。⑥区域水资源利用量。包含过境水资源的水权分配量。⑦COD 区域排放量、 NH_3-N 区域排放量。以市级行政区域为统计单元,包括区域外排放量。⑧河道生态用水保证率。参照有关科研成果以分析区典型河道估算^[32]。⑨正向型指标变量越大水质越好,反向型指标变量越小水质越好。

表 2 江苏南水北调供水区水质驱动因素变量指标数据统计结果

Tab. 2 Statistical results of driving factors of water quality in water supply area of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province

变量指标	平均值	标准差	最小值	最大值	变量指标	平均值	标准差	最小值	最大值
Y	5.53	0.88	4.19	6.74	x_{13}	2.87	0.95	1.53	3.95
x_1	2 419.65	46.65	2 387.42	2 520.16	x_{14}	1 464 480	198 736.47	1 032 670	1 594 310
x_2	56.21	4.43	52.50	64.40	x_{15}	605.24	73.87	432.55	632.62
x_3	7.92	3.00	2.02	10.71	x_{16}	944.70	198.49	713.20	1 270.50
x_4	9.67	2.40	7.20	14.50	x_{17}	1.60	1.22	0.90	4.50
x_5	5 617.76	2 355.17	1 195.71	8 619.32	x_{18}	16.28	3.81	10.21	21.33
x_6	75 224	15 370.63	44 753	88 369	x_{19}	1.85	0.65	1.12	2.93
x_7	80.60	13.55	66.30	102.40	x_{20}	7.27	2.78	2.18	10.55
x_8	52.60	27.46	27.10	107.40	x_{21}	1.23	0.34	0.91	1.92
x_9	9 255 730	880 304.10	7 633 290	10 234 200	x_{22}	26.52	7.95	17.52	41.33
x_{10}	575	122.77	441	793	x_{23}	13.77	2.07	12.51	18.38
x_{11}	59	9.51	42	68	x_{24}	87.40	4.72	78.80	93.20
x_{12}	34 711	6 272.69	25 194	45 226					

表 3 江苏南水北调供水区水质驱动因素模型统计检验

Tab. 3 Statistical test for driving factor model of water quality in water supply area of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province

指标	R	R ²	调整后 R ²	标准估算的误差
数值	0.998	0.996	0.994	0.196

表 4 江苏南水北调水质驱动因素模型回归系数

Tab. 4 Regression coefficient of driving factor model of water quality in water supply area of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province

指标	未标准化系数	标准化系数	t 值	显著性 p 值
(常量)	1.599		20.589	0.031
x_{18}	0.163	0.713	42.575	0.015
x_{12}	3.66×10^{-5}	0.288	17.168	0.037

表 5 江苏南水北调水质正向驱动因素模型统计检验

Tab. 5 Statistical test for forward driving factor model of water quality in water supply area of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province

指标	R	R ²	调整后 R ²	标准估算的误差
数值	0.996	0.991	0.982	0.170 618 668

表 6 江苏南水北调水质正向驱动因素模型回归系数

Tab. 6 Regression coefficient of forward driving factor model of water quality in water supply area of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province

指标	未标准化系数	标准化系数	t 值	显著性 p 值
(常量)	-0.041		-5.69	0.111
x_{11}	-0.089	-0.764	-33.975	0.019
x_{20}	-0.072	-0.238	-19.09	0.033

回归方程形式为

$$y = -0.089x_{12} - 0.72x_{20} - 0.041 \quad (5)$$

标准化后的回归方程为

$$y = -0.764x_{11} - 0.238x_{20} \quad (6)$$

2.2 水质驱动因素回归结果

全驱动因素回归分析表明,显著性指标为生活服务业用水量和 COD 区域排放量,均属于污染驱动因素,说明江苏南水北调供水区水环境污染的 EKC 曲线仍处于上升阶段^[34]。生活服务业用水量、COD 区域排放量与水质指标的五日生化需氧量(BOD₅)呈正相关,即生活服务业用水量每增加 1 万 m³,五日生化需氧量平均质量浓度会相应提高 3.66×10^5 mg/L;COD 区域排放量每增加 1 万 t,五日生化需氧量平均质量浓度会相应提高 0.163 mg/L。

正向驱动因素回归分析表明,显著性指标为灌溉渠系水利用率、区域水污染治理投资。灌溉渠系水利用率、区域水污染治理投资与水质指标的五日生化需氧量(BOD₅)呈负相关,即灌溉渠系水利用率

每增加 1 个单位,五日生化需氧量平均质量浓度会相应降低 0.089 mg/L;区域水污染治理投资每增加 1 亿元,五日生化需氧量平均质量浓度会相应降低 0.72 mg/L。

2.3 要素影响原因

生活服务业用水主要包括城乡居民生活用水、餐饮服务业用水。江苏南水北调供水区覆盖的徐州、宿迁、淮安、扬州及其泰州市区的城市居民生活污水处理率已经达到 80%,最高的徐州市 2018 年达到 86%,但县域及其乡镇区域生治污水处理率普遍低于 60%的考核标准,面广量大的农村生活污水处理率不到 20%。生活污水处理率低是影响水质达标的重要因素之一。其次是面广量大的餐饮服务业污水收集率设区的市级城市仅达到 20%左右,县域及其乡镇区域多是直接排放,这是造成河道 COD 超标的主要原因。

农业灌溉尾水排放形成的面源污染已经取代点源污染成为河流水环境污染的最重要来源^[35],污染当量超过 70%^[36]。江苏南水北调供水区农业灌溉用水占区域总水量的 65%以上,提高灌溉水利用率,不仅可以降低区域用水量,而且可以减少农业灌溉尾水排放,减轻氮磷排放的面源污染。

江苏南水北调供水区列入南水北调工程治污投资为 59.15 亿元,区域配套投资为 11.09 亿元,区域治污总投资为 70.24 亿元^[21];按常规污水一级 A 排放标准、平均成本 1.05 元/t 估算,总投资需求达到 160 亿元;投资不足是影响水质季节性不达标的重要原因。

2.4 主要对策建议

以江苏南水北调供水区覆盖的市级行政辖区为控制单元,分类量化污染排放当量及其长效管理责任,明确省政府对市级政府的考核范围,“倒逼”地方政府加大水污染治理投资,以克服单纯依靠南水北调工程治污投资的不足。

整合省级涉农项目节水灌溉投资,提高江苏南水北调供水区县级节水灌溉的配套投资比例,实行农业灌溉用水定额外加价政策,通过提高水价“倒逼”县级政府落实配套资金,促进农业节水,减少农业污染物的携带性排放。

优化水污染管制政策,严禁城市生活服务业污水直接排放,对餐饮服务业点状排放源由排放者收集运至污水处理厂,建立用水量与收集量考核奖励机制。对农村生活服务业污水实行集中收集,就地进行无害化处理,具备条件地区实行达标排放。

强化河道内源治理,推行河道淤积速率监测,量化河道淤积层排放当量,使用“原位清淤,生态护岸”等技术手段,控制淤积性污染扩散。

3 结 论

立足江苏南水北调区域特点,针对水质污染治理成效,对水质因子和驱动因子进行分析论证,选取五日生化需氧量(BOD₅)作为因变量表征,从经济社会发展水平、产业发展规模、水资源承载能力、典型污染物排放规模、水污染治理投资、生态环境政策 6 个方面选择驱动因素,建立 24 个自变量表征指标系。采用 Step-Wise 回归分析方法,得出了驱动因子与水质之间的量化关系即水质驱动回归模型,模型拟合度较高,可依此解释和预测未来水质变化的趋势。水质驱动回归模型表明,所有影响因素中生活服务业用水量和 COD 区域排放量对水质影响最大,生活污水处理率低和餐饮服务业污水收集率低是水污染超标的重要原因;而在所有正向驱动因素中,灌溉渠系水利用率及区域水污染治理投资对水质的影响最大。在水质驱动因素定量分析基础上,提出江苏南水北调供水区应重点加强面源减排、点源控排、加大水污染治理投资、落实生态环境保护政策等水质改善措施。

参考文献(References):

- [1] 张平,郑垂勇.南水北调东线受水区水资源优化配置研究[J].水利经济,2006,24(4):61-64.(ZHANG P,ZHENG C Y. Reseaches on water resources allocation of the east route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2006,24(4):61-64. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1003-9511. 2006. 04. 020.
- [2] 高鸣远.南水北调东线工程江苏省受水区水质现状[J].水资源保护,2012,28(1):64-66.(GAO M Y. Analysis of water quality in water-receiving areas in Jiangsu Province on eastern route of South-to North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection,2012,28(1):64-66. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2012. 01. 015.
- [3] 江苏省水利厅.2017年江苏省水资源公报[R].2018.(Water Resources Department of Jiangsu Province of China. 2017 Water Resources Bulletin[R]. 2018. (in Chinese))
- [4] 龙浩然.流域水质变化驱动力研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(4):91-93.(LONG H R. Research progress of driving forces of water quality in watershed [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(4):91-93. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2016. 04. 031.
- [5] 黄沈发,王敏,车越,等.平原河网地区水源地水质对土地利用变化的响应——以黄浦江上游水源地为例[J].生态与农村环境学报,2006,22(4):14-19.(HUANG S F,WANG M,CHE Y,et al. Effect of land use on water quality in waterhead region in river network plain, A case study of the upper Huangpu River[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(4):14-19. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-4831. 2006. 04. 003.
- [6] 高伟,陈岩,徐敏,等.抚仙湖水质变化(1980—2011年)趋势与驱动力分析[J].湖泊科学,2013,25(5):635-642.(GAO W,CHEN Y,XU M,et al. Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian (1980-2011) [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(5):635-642. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2013. 0503.
- [7] 胡兰心.基于时间序列分析的上海水质变化趋势及社会经济驱动研究[D].上海:华东师范大学,2014.(HU L X. Water quality changes based on time series analysis of trends and socio-economic-driven research in Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University,2014. (in Chinese))
- [8] 张姗姗,张落成,李刚,等.千岛湖流域水质变化与经济发展耦合协调性分析[J].湖泊科学,2014,26(6):948-954.(ZHANG S S,ZHANG L C,LI G,et al. Coordination analysis between water quality and economic development in Lake Qiandao basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(6):948-954. (in Chinese)) DOI:10. 18307/2014. 0618
- [9] 周侃,樊杰,刘汉初.环渤海地区水污染物排放的时空格局及其驱动因素[J].地理科学进展,2017,36(2):171-181.(ZHOU K,FAN J,LIU H C. Spatiotemporal patterns and driving forces of water pollutant discharge in the Bohai Rim Region[J]. Progress in Geography, 2017,36(2):171-181. (in Chinese)) DOI:10. 18306/dlkxjz. 2017. 02. 004
- [10] PALMER S C J,KUTSER T,HUNTER P D. Remote sensing of inland waters: challenges, progress and future directions[J]. Remote Sensing of Environment, 2015,157:1-8. DOI:10. 1016/j. rse. 2014. 09. 021
- [11] 刘慧丽,戴国飞,张伟,等.鄱阳湖流域大型湖库水生生态环境变化及驱动力分析——以柘林湖为例[J].湖泊科学,2015,27(2):266-274.(LIU H L,DAI G F,ZHANG W,et al. Analysis of the water ecological environment changes of the large lakes and driving factors in Lake Poyang basin: A case study of Lake Zhelin[J]. Journal of Lake Sciences,2015,27(2):266-

274. (in Chinese)) DOI:10.18307/2015.0210
- [12] 王超,单保庆,秦晶,等. 海河流域社会经济发展对河流水质的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2354-2361. (WANG C, SHAN B Q, QIN J, et al. The impact of socioeconomic development on the river water quality in the Haihe River basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8): 2354-2361. (in Chinese)) DOI:10.13671/j. hjkxxb. 2015. 0030
- [13] TEIXEIRA Z, TEIXEIRA H, MARQUES J C. Systematic processes of land use/land cover change to identify relevant driving forces; Implications on water quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470: 1320-1335. DOI:10.1016/j. scitotenv. 2013. 10. 098
- [14] 于东升,袁宏林,张颖,等. 太湖西岸水质变化趋势及主要驱动因子[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(10): 1063-1066. (YU D S, YUAN H L, ZHANG Y, et al. Trend and dominating factors of water quality change in the west bank of Taihu Lake [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, 39(10): 1063-1066. (in Chinese)) DOI: 10.15985/j. cnki. 1001-3865. 2017. 10. 004
- [15] 刘叶叶,毛德华,杨家亮,等. 1990—2016 年湘江干流水质变化特征及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 820-827. (LIU Y Y, MAO D H, YANG J L, et al. Analysis on the water quality change characteristics and influencing factors of the Xiangjiang River mainstream from 1990 to 2016 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(4): 820-827. (in Chinese)) DOI:10.7522/j. issn. 1000-0240. 2018. 0088
- [16] 李中杰,郑一新,张大为,等. 滇池流域近 20 年社会经济发展对水环境的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 875-882. (LI Z J, ZHENG Y X, ZHANG D W, et al. Impacts of 20-year socio-economic development on aquatic environment of Lake Dianchi Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(6): 875-882. (in Chinese)) DOI:10.3969/j. issn. 1003-5427. 2012. 06. 010
- [17] 张彦,窦明,于璐. 小型人工湖泊水环境变化特征分析及驱动因子识别[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2): 746-753. (ZHANG Y, DOU M, YU L. Identification of the influential factors and analysis of the varying characteristics for the water environment of the small artificial lakes and pools [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(2): 746-753. (in Chinese)) DOI:10.13637/j. issn. 1009-6094. 2017. 02. 065
- [18] 田夏,费宇红,李亚松,等. 南襄盆地浅层地下水质量影响因子解析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 132-136. (TIAN X, FEI Y H, LI Y S, et al. Impact factors of shallow groundwater quality in the Nanyang-Xiangyang basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(6): 132-136. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 06. 019
- [19] 陆明春,张艳霞,张悦. 江苏境内南水北调东线一期工程输水干线水质污染情况调查研究[J]. 水利技术监督, 2016, 24(4): 31-34. (LU M C, ZHANG Y X, ZHANG Y. Investigation and Study on Water Pollution of the Main Water Transfer Line of the East Route of the South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province [J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2016, 24(4): 31-34. (in Chinese)) DOI:10.3969/j. issn. 1008-1305. 2016. 04. 012.
- [20] 郭鹏,任静. 南水北调东线一期工程沿线历年水质变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 59-64. (GUO P, REN J. Variation trend analysis of water quality along the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(1): 59-64. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2014. 01059
- [21] 王一舒,逢勇,罗缙,等. 南水北调东线(江苏段)水质变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 104-107. (WANG Y S, PANG Y, LUO J, et al. Analysis of change tendency of water quality in East Line of South-to-North Waterdiversion Project of Jiangsu section [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 25(4): 104-107. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j. issn. 1672-643X. 2014. 04. 021
- [22] 张树麟,王会容,朱乾德. 南水北调东线江苏段水污染防治成效研究[A]. 中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷)[C]. 中国环境科学学会, 2011. (ZHANG S L, WAN H R, ZHU Q D. Study on the effect of water pollution prevention and control in Jiangsu Section of the East Route of South-to-North Water Transfer Project [A]. *Proceedings of the 2011 Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences (Volume I)* [C]. Chinese Society of Environmental Sciences, 2011. (in Chinese))
- [23] 李云燕,王立华. 基于 Step-Wise 回归分析的京津冀雾霾驱动因素研究[J]. 中国发展, 2018, 18(1): 6-12. (LI Y Y, WANG L H. Research on driving factors of haze in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on Step-Wise multiple linear regression [J]. *China Development*, 2018, 18(1): 6-12. (in Chinese)) DOI: 10.15885/j. cnki. cn11-4683/z. 2018. 01. 005
- [24] 中国环境规划院,水利部淮委,国家给排水中心,等. 南水北调东线工程治污规划[R]. 2001. (Chinese Academy of Environmental Planning, Huaihe

- Committee of the Ministry of Water Resources, National Water Supply and Drainage Center, et al. Pollution control planning for the East Route of South-to-North Water Transfer Project[R]. 2001. (in Chinese))
- [25] 颜志俊,张明月,逢勇,等.南水北调东线江苏段深化治污重点方向及措施[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):42-46.(YAN Z J,ZHANG M Y,PANG Y, et al. Key direction and measures of further pollution treatment in Jiangsu Section of Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12 (4): 42-46. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.2014.04.010
- [26] 江苏省南水北调办公室.江苏南水北调控制单元水质监测资料汇编[R].2012.(Jiangsu South-to-North Water Transfer Office. Compilation of water quality monitoring data of Jiangsu South-to-North Water Control Unit[R]. 2012. (in Chinese))
- [27] 张素英.南水北调东线江苏段水污染防治现状及水质保证措施探讨[J].南水北调与水利科技,2009,7(2):18-20.(ZHANG S Y. Analysis and study on the existing water pollution prevention and water quality guaranteeing measures of the South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7 (2): 18-20. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.02.007
- [28] 刘玉年,万一,徐亚东.南水北调东线一期工程水质分析[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):264-268.(LIU Y N,WAN Y,XU Y D. Water quality analysis for the first stage of South-to-North Water Transfer East Line Project [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2005, 33(3): 264-268. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-1980.2005.03.007
- [29] 孔令雪,孔祥瑞,薛晓玲,等.导致河道水中氨氮和总磷超标的主要污染物成因及防治[J].农业开发与装备,2017(11):108.(KONG L X,KONG X R,XUE X L, et al. Causes and prevention of major pollutants causing excessive levels of ammonia nitrogen and total phosphorus in river water[J]. Agricultural Development & Equipments, 2017 (11): 108. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-9205.2017.11.091
- [30] 江苏省人民政府法制办公室.江苏省南水北调工程沿线区域水污染防治管理办法[R].2012.(Legal Office of Jiangsu Provincial People's Government. Measures for the prevention and control of regional water pollution along the South-to-North Water Transfer Project of Jiangsu Province[R]. 2012. (in Chinese))
- [31] 范坤,冯长焕.因子分析中指标数据如何正确预处理[J].财会月刊,2013(6):85-88.(FAN K,FENG C H. How to correctly preprocess indicator data in factor analysis[J]. Finance and Accounting Monthly, 2013 (6): 85-88. (in Chinese)) DOI: 10.19641/j.cnki.42-1290/f.2013.06.029
- [32] 潘扎荣,阮晓红,徐静.河道基本生态需水的年内展布计算法[J].水利学报,2013,44(1):119-126.(PAN Z R,RUAN X H,XU J. A new calculation method of instream basic ecological water demand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 119-126. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.0559-9350.2013.01.018
- [33] 江苏省人民政府.南水北调东线江苏段控制单元治污实施方案[Z],苏政复[2005]28号,2005.(Jiangsu Provincial People's Government. Implementation plan for pollution control of the control unit of the Jiangsu section of the East Route of the South-to-North Water Transfer Project [Z]. Su Zhengfu No. 28 [2005]. 2005. (in Chinese))
- [34] 杨晓庆,朱继业.江苏省水环境污染与经济发展关系研究[J].国土资源科技管理,2013,30(2):130-136.(YANG X Q,ZHU J Y. Study on the relationship between water environment pollution and economic development in Jiangsu Province [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2013, 30(2): 130-136. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1009-4210.2013.02.023
- [35] ZIA H, HARRIS N R, MERRETT G V, et al. The impact of agricultural activities on water quality: a case for collaborative catchment-scale management using integrated wireless sensor networks [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 96 : 126-138. DOI:10.1016/j.compag.2013.05.001
- [36] 黄晓龙,于艳新,丁爱中,等.农田尾水污染治理策略研究进展[J].中国农村水利水电,2016(7):46-50.(HUANG X L,YU Y X,DING A Z, et al. Review on tailwater pollution control strategies in farmland[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(7): 46-50. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2016.07.011