

南水北调东线工程徐州段河流生境质量评价¹

王雁¹，赵家虎^{1, 2}，黄琪^{3, 1}，高俊峰^{1*}

(1 中国科学院南京地理与湖泊研究所，江苏南京 210008 ；

2 中国科学院大学，北京 100049 ；

3 . 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室，江西南昌 330022)

摘要：河流生境质量评价是河流生态系统健康评价的关键之本文评价自然和人为作用下的河流生境质量，以南水北调东线工程徐州段丰县、邳州市输水通道上的河流为研究对象，结合环境特点，选择了反映河道生境、河岸生境和滨岸带生境的 10 个指标，给出了每个指标的评价方法和 5 级标准特征值，建立河流生境质量评价体系，确定评价指标的等级标准，对研究区内 16 个河段的生境质量状况进行综合评价结果表明：(1) 河流生境质量指数 (I RHQ) 综合得分介于 33 — 91 。根据评价等级划分标准，其中有 50 % 的河段生境质量达到“优”等，其余介于“良”等到“劣”等，河流生境质量整体状况良好。(2) 河流生境质量指数与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD、TN 呈负相关，与 Do 呈正相关，多项生境指标也与水质指标具有相关性，表明生境质量与水质的相互影响

关键词：河流生境；指标体系；质量评价；南水北调东线

中图分类号：x826 **文献标识码：**A **文章编号：**1004 — 8227 (2016) 06 — 0965 — 09

DOI : 10 . 11870 / cjlyzyyhj201606013

河流生境即河流栖息地，是河流生物生存的环境^[1]，在空间结构上包括了河道、河岸和滨岸带^[2, 3]。河道是汇集和接纳地表及地下径流的场所，河岸是河道两侧高低水位之间被水淹没的区域，滨岸带是河岸和周围景观的过渡带，主要指滨河的植被缓冲带^[4]。河流生境是维持河流生态系统健康的重要前提^[5]，河流生境质量评价可反映河流生态系统的健康程度，有助于识别导致河流生态退化的原因，为河流生态保护与修复提供科学依据^[6]。随着河流生态环境问题日益突出，河流生境质量评价研究受到广泛重视，国内外发展出多种河流生境评估指标和方法，综合考虑河流水文特征、水质状况、河床形态、生态结构等与河流栖息地之间的关系，从整体上对生境做出综合评估。如《河流快速生物评估草案》(Rapid Bio — assessment Protocol)，

¹收稿日期：2015 — 08 — 23 ；修回日期：2016 — 0108

基金项目：国家水污染治理重大专项 (2012ZX07501002-008, 2012ZX07506 — 001, 2012ZX07103003 — 0401, 2012ZX07501 — 001- 03) ；国家重点基础研究发展计划 (2012CB417006)

作者简介：王雁 (1983 —)，女，博士，主要从事流域生态资源利用与环境效应研究 E — mail : ywang @ nigns.ac.cn

* 通讯作者 E — mail : gaojunf@nignlas.ac.cn

RBP)^[7]、栖息地适宜性指数(Habitat suitability Index Models, HIS)^[8]、河流条件指数(Index of Stream Condition, ISC)^[9]、澳大利亚河流评估系统(Australian River Assessment system, Au5RivEs)、河流栖息地调查(River Habitat survey, RHS)^[10]等。国内对河流生境质量评价研究也在挠力河^[1]、东河^[3]、辽河^[6]等流域展开,研究对象除了自然状态下的山区河流,也包括平原地区的城市河流^[11~14]。自然河流生境质量主要取决于河流自然地理状况,评价指标更加关注对河流生境变化最敏感的生物指标,如鱼类、大型底栖动物和硅藻等着生藻类。流经人口密集区的平原河流生境状况受自然和人为因素的综合影响,评价指标需要考虑能反映人为因素影响的人类活动强度、土地利用类型等指标。南水北调东线工程过境区域是快速城市化和工业化地区,河道的截弯取直、渠道化、河岸硬化等水利工程改变了河流自然形态,引起生物生存空间发生改变^[15],河流的自然水文节律受调水工程干扰,生态环境效应也受到影响。目前这一区域已开展的研究包括工程沿线的环境效益^[16, 17]、水质影响^[18]、湿地生态环境变化^[19]等,在此基础上进行河流生境质量评价,有助于确定东线工程通水初期河流生境的本底状况,明确该区域河流生境特点和影响河流生态健康的原因。

如何根据研究区环境特点,筛选评价河流生境的指标,建立适合的评价体系,识别造成河流生态系统退化的因素,对于分析当地河流生境质量状况的变化,反映调水工程对过境地区生境质量的影响具有重要意义。基于以上科学目标和现实问题,本文以位于南水北调东线徐州段的丰县和邳州境内河流为研究对象,参考相似环境条件下的河流生境及水生态系统健康评价研究^[11, 14, 20],建立相应的评价指标及分级标准,依据实地调查,对研究区河流生境质量做出评价,确定东线通水初期的河流生境状态,为构建河流生境评价方法体系提供参考,为河流生态保护、生态系统恢复以及河流整治等提供科学基础。

1 研究区概况与数据来源

研究区地处南水北调东线工程中段(图1),是担负调水和输水任务的重要节点城市,区内作为输水通道及汇入其中的河流有:中运河、韩庄运河、不牢河、房亭河、徐洪河、复兴河等^[21, 22]。丰县位于江苏省西北部,是南水北调东线工程江苏段的最北端,多年平均降水量753.9 mm,汛期(6—9月)降水量占全年的68%,水资源量时空分布不均,属资源型缺水地区。工仔州地处江苏省北部南水北调东线工程与淮河水系交汇处,属淮河流域沂沭泗水系,多年平均降雨量为843.1 mm,是宿迁、徐州两市重要水源地。

选择研究区13条河流上16个河段进行生境质量调查,河段选取条件为:(1)区内的骨干河流,在大沙河、复新河、中运河等主要大河的上下游分别选取调查河段;(2)南水北调重要输水线路,如邳苍分洪道、中运河、徐洪河、房亭河;(3)包括航运、灌溉及景观等不同功能的河道;(4)重要水生态功能区的河段,如大沙河重要湿地和特殊物种保护区,邳苍分洪道行洪调蓄区,郑集河、中运河、房亭河、徐洪河清水通道维护区。研究区丰县(F1—F8)和邳州(P1—P8)的调查河段及采样位置如图1所示,实地调查工作于2014年5—6月进行,河流生境调查方法参考英国河流栖息地调查(RHS)^[23]和《河流生态调查技术方法》^[24],同时结合研究区河流生境实际及环境影响快速评价的要求。每个调查河段取200m长、左右河岸带各100m宽的代表性河段作为生境调查单元,使用GPS记录调查的起点、中点和终点的经纬度及海拔。利用透明度盘、测距仪、流速仪等工具对河流的透明度、水面宽度、河岸坡度、流速、水深等参数进行测定。目测判定水体色泽、气味、水量、河床底质状况、河岸侵蚀程度、河道生境组成结构、滨岸带人类活动、水工设施建设等情况,辅助以拍照记录。

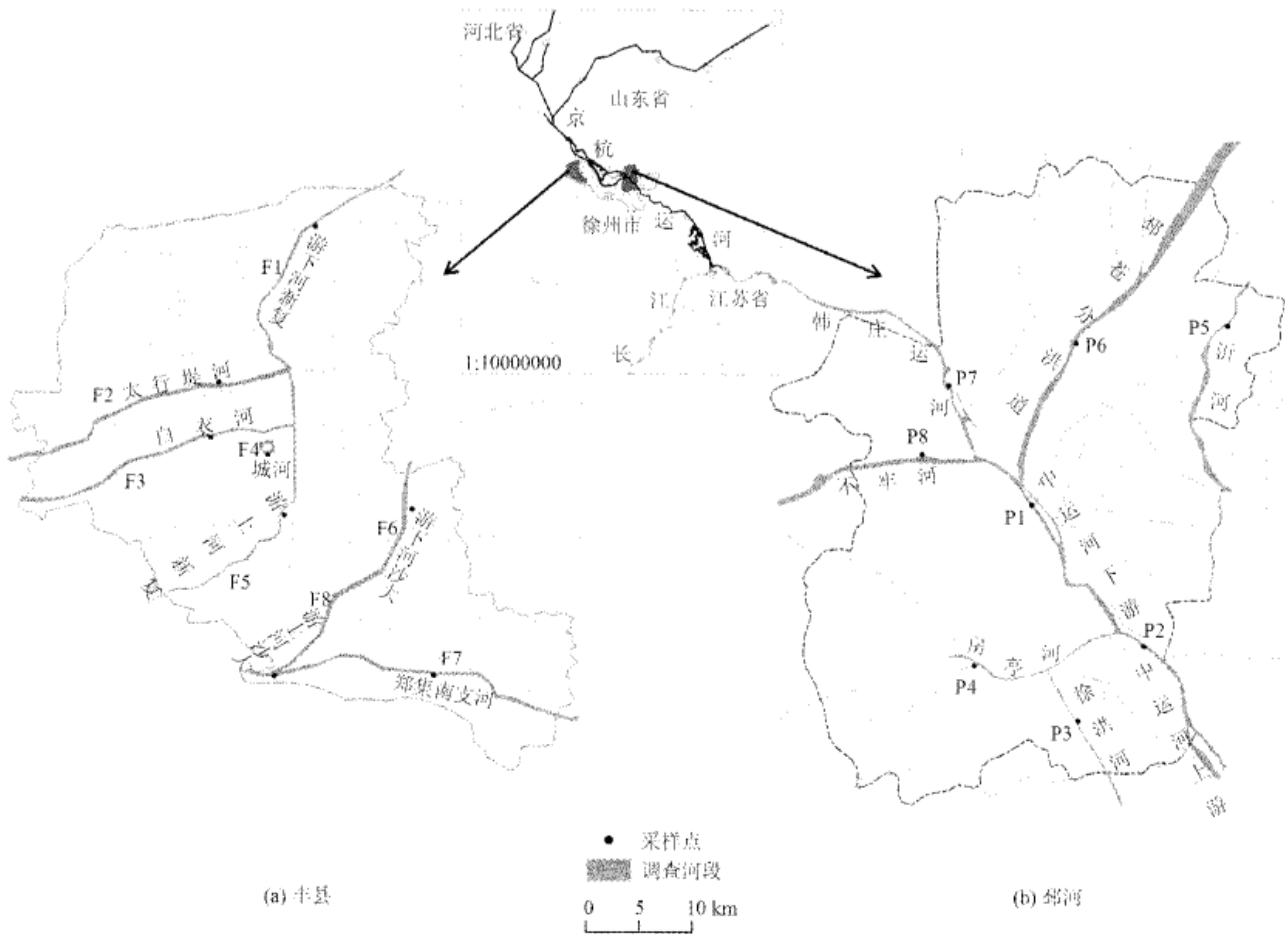


图 1 研究区调查河段采样点及其代表河段分布 ((a)丰县,(b)邳州)

Fig.1 Location of Sampling Point and Reaches in Study Area ((a) Fengxian,(b) Pizhou)

通过实地调查及 2014 年 5 月 Landsat TM 卫星影像遥感解译获得河岸植被盖度和组成等信息。采用便携式多参数水质分析仪（型号 YSI — 6600v2 ）现场测定河流的水温、pH 、溶解氧（DO ）、总溶解性固体（TDS ）、电导率（EC ）。同时采集 1 000 mL 水样固定后放置于密封采样容器中置于 4 ° C 保温箱，带回实验室测定总氮（TN ）、总磷（TP ）、氨氮（ NH_4^+-N ）、化学需氧量（COD ）。水样的采集、保存和分析按照《水和废水监测分析方法》^[25]中的相关实验方法进行。同时，为减小系统误差，以上样品均重复测定 3 次，数据分析过程中取其平均值。

2 研究方法

2.1 河流生境评价指标体系构建

2.1.1 确定河流生境评价指标

河流生境质量综合评价指标选取参考了与研究区环境条件相近的太湖等流域^[11, 13, 14]，筛选出能体现平原河流特征并反映人为影响的指标^[12—14]，建立适合研究区的河流生境质量评价指标系统和评分标准^[26]（表 1 ）。评价体系以河流生境质量为目标层，以河道、河岸、滨岸带为要素层，以河道生境多样性、河道生态水量满足程度、表观水质、河道宽深比、河道蜿蜒度、河岸稳定性、河岸坡度、河岸植被多样性、滨岸带植被宽度和人类活动干扰强度为指标层。

表 1 河流生境质量评价体系
Tab.1 Indices System of River Habitat Quality Assessment

项目	评价指标	评分标准				
河道	河道生境多样性	小生境类型齐全，分布均匀	小生境类型齐全，但分布不均；或类型缺少1~2种，但分布均匀	小生境类型不齐全，缺少1~2种，且分布不均匀	小生境类型1~3种，且分布不均匀	小生境类型单一，底质多为淤泥、细沙等
	河道生态水量满足程度/%	水量大，淹没河道程度>75	水量较大，淹没河道程度60~75	水量一般，淹没河道程度40~60	水量较小，淹没河道程度25~40	水量近干涸，淹没程度<10
	表观水质	清澈透明，无异味	轻微浑浊，少量异味	比较浑浊，较大异味	很浑浊，很大异味	极端浑浊，恶臭味
	河道宽深比	>30	30~20	20~10	10~5	<5
河岸	河道蜿蜒度	>4	3~4	2~3	1~2	<1
	河岸稳定性	侵蚀率<10%	侵蚀率<20%	侵蚀率20~50%	侵蚀率50~80%	侵蚀率>80%
	河岸坡度/°	<5	5~30	30~75	75~90	>90
	河岸植被多样性	乔灌木结合，植被盖度75%	乔灌、乔草结合，植被盖度75~40%	灌草结合，植被盖度40~10%	植被类型单一，植被盖度<10%	基本没有植被
滨岸带	滨岸带植被	有林地或草地，没有耕地或居民点，植被缓冲带宽度>18m	有少量耕地无居民点，植被缓冲带宽度12~18m	有耕地，无居民点，有植被缓冲带保护，宽度6~12m	有耕地和居民点，有植被缓冲带保护，宽度<6m	有建筑物和居民点，没有植被缓冲带
	宽度					
	人类干扰强度	少有或没有人类活动	人类干扰较小，有少量步行者或非机动车通过	人类活动较多，少量机动车经过，有闸坝等水工设施	多种人类活动，对河流影响大，但污染不严重	人类活动密集，交通要道，污染严重
	赋予分值	9~10	7~8	5~6	3~4	1~2

2.1.2 河流生境质量评价标准及评分方法

将指标层的每一项指标按优劣程度指标分成 5 级，每级 2 分，即单项满分 10 分，依据调查结果打分，河岸和滨岸带指标左右两岸分别打分后平均。再将各指标分值累加获得河道生境（IA）、河岸生境（IB）、滨岸带生境（IC）要素分值。IA、IB、IC 求和得到每个调查河段的河流生境质量指数（index of river habitat quality，IRHQ），IRHQ 满分为 100 分。

2.1.3 综合得分标准化及等级确定

通过确定指标期望值和阈值，采用标准化公式（1）对 IA、IB、IC 标准化以确保其值分布范围在 0—1。

$$S = 1 - (|T - X|) / (|T - B|) \quad (1)$$

式中：S 为评价指标的标准化计算值；T 为期望值；B 为临界值；X 为实际值。期望值为自然状态下的评价参数值，代表河流生境最佳状况；临界值指受到人类活动干扰后，河流生境面临崩溃的阈值，代表河流生境最差状况。本研究以调查样点 5 % 分位数为期望值，调查样点 95 % 分位数为临界值^[20, 27]。采用等权相加计算得到河流生境质量标准化综合得分 LEI，见公式（2）：

$$LEI = \sum_{k=1}^l D_k \times U_k \quad (2)$$

式中：D_k 为第 k 项要素的标准化得分，包括 IA、IB、IC 三项；U_k 为对应的指标权重。在权重设置上，生境指标反映了物理、化学环境以及生态系统中生物交互作用的一个方面，因此对每一项生境指标采用相同的权重，河道、河岸、滨岸带分别包含了 5 个、3 个和 2 个生境指标数，IA、IB、IC 权重分别取 50 %、30 % 和 20 %。采用等分法将 LEI 分为五个等级，

分级标准分别为优[0 . 8 — 1 . 0]、良[0 . 6 — 0 . 81] 中 [0 . 4 — 0 . 6]、差[0 . 2 — 0 . 4]、劣[0 — 0 . 2]。

2 . 2 数据分析方法

(1)用统计软件 SPSS 19 . 0 进行相关分析,确定生境指标与水质指标的相关系数及相关性水平。利用非参数分析中 Shapiro — Wilk (S — W) 检验法对各个参数进行正态分布检验,满足正态分布的参数采用 Pearson 相关分析法,不满足正态分布的参数采用 Spearman 相关分析法。

(2) 在 Canoco 4 . 5 上进行除趋势对应分析(DCA) 和冗余分析(RDA) , 确定不同生境特征因子对流域水质变化影响的贡献。

3 结果与分析

3 . 1 河流生境质量综合评价

各河段河流生境质量分值和等级如表 2 所示,从空间分布上分析,部分生境质量优等的河段位于上游或输水干线,如丰县大沙河上游(F8)、中运河上游(P2),大沙河属于饮用水源保护区,中运河是南水北调东线工程输水干线,属于调水保护区,水质较洁净,河岸植被覆盖度高,距城区较远。也有部分下游河段经综合整治和生态修复,生境状况得到改善,如邳州中运河下游(P1)、大沙河下游(F6)。城区或下游的河段生境质量相对较差,如城河(F4)、徐洪河(P3),受排污、航运影响,表现为水生植被退化、河流渠道化、河岸硬化、滨岸带人为活动强度大,土地开发程度高。比较邳州和丰县得分情况,邳州的河道生境多样性和表现水质指标得分较高,IA、IB、IC 和 IRQH 等级为优的河段也多于丰县。邳州大多数河流的自然形态保持较好,河岸植被类型多样,而丰县水资源相对短缺,水环境污染问题较突出,虽然河岸植被覆盖率较高,但植被品种和生境类型相对单一。比较各指标得分情况,得分普遍较高的指标是生态水量满足程度和河岸稳定性,研究区大部分河段水量丰沛,河岸较稳定,坡度一般小于 300 ,较少受到水流侵蚀,河岸多为自然护坡,植被覆盖率较高,植被结构包括乔木、灌木和草本,但城区河段受人类干扰较大。

表 2 研究区河流生境质量评价结果
Tab.2 Result of River Habitat Quality Assessment in Study Area

河段编号	名称	河道得分IA	河岸得分IB	滨岸带得分IC	IRQH总分	河流生境质量等级
F1	复新河下游	40	27	17	84	良
F2	太行堤河	37	26	15	78	中
F3	白衣河	33	26	15	74	差
F4	城河	17	13	3	33	劣
F5	复新河上游	37	27	15	79	良
F6	大沙河下游	40	28	17	85	优
F7	郑集南支河	34	24	8	66	良
F8	大沙河源头	43	28	19	90	优
P1	中运河下游	46	29	16	91	优
P2	中运河上游	41	27	16	84	优
P3	徐洪河	28	22	8	58	劣
P4	房亭河	41	25	14	80	优
P5	沂河	42	29	16	87	优
P6	邳苍分洪道	41	28	16	85	优
P7	韩庄运河	40	25	16	81	良
P8	不牢河	43	28	16	87	优

3 . 2 河流水质与生境质量的相关性

3.2.1 河流水质状况

研究区各河段大部分采样点 DO 符合国家地表水环境标准 (GB3838 — 2002) 中 II 类水 (表 2)。COD 符合国家地表水环境标准中 III — IV 类水标准。约 50 % 采样点 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 符合 III 类水标准。TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 COD 浓度较高的采样点出现在流域下游或城区河段。

表 3 采样河段水质指标

Tab.3 Water Quality Parameters of Sampling Reaches

	水温(°C)	pH	DO(mg/L)	电导率(μS/cm)	矿化度(mg/L)	浊度(NTU)	TDS (mg/ L)	SD(m)	COD (mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/ L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
最大	31.0	9.13	9.70	1.87	0.88	82.30	1.20	0.80	44.37	2.62	4.31	0.27
最小	20.4	6.99	4.20	0.70	0.34	2.10	0.46	0.20	14.19	0.34	0.64	0.04
平均	26.3	7.97	6.91	1.11	0.58	20.97	0.72	0.50	23.68	1.09	1.48	0.11

3.2.2 生境指标与水质指标相关分析

S — W 检验结果表明水温、DO、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD、TN、TP 和表观水质指数满足正态分布,采用 Pearson 相关分析。pH、电导率、矿化度、浊度、TDS、SD、河道生境多样性、生态水量满足程度、河道宽深比、河道蜿蜒度、河岸稳定性、河岸植被多样性、河岸坡度、滨岸带植被宽度、人类干扰强度及 IA、IB、IC 和 IRHQ 不满足正态分布,采用 Spearman 相关分析。

相关分析结果显示,河道生境多样性、表观水质、河道宽深比、河道蜿蜒度、河岸坡度、滨岸带植被宽度和人类干扰强度 7 个指标与主要水质指标呈显著相关,而生态水量满足程度、河岸稳定性和河岸植被多样性 3 个指标只与少数理化指标呈显著相关 (表 4)。DO、COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 等水质指标与大部分河流生境指标呈显著相关,说明这些指标对河流生境质量比较敏感。

表 4 生境指标与水质指标相关分析

Tab.4 Correlation Analysis Between River Habitat Indicators and Water Quality Parameters

	水温	pH	DO	电导率	矿化度	浊度	TDS	SD	COD	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
河道生境多样性	-0.487	-0.129	0.218	-0.598*	-0.650**	-0.643**	-0.636**	0.009	-0.759**	-0.421	-0.385	-0.358
生态水量满足程度	-0.533*	-0.149	0.149	-0.248	-0.147	-0.361	-0.196	0.095	-0.243	0.134	-0.357	-0.107
表观水质	-0.324	-0.087	0.219	-0.514*	-0.638**	-0.541*	-0.608*	-0.251	-0.728**	-0.645**	-0.557*	-0.566*
河道宽深比	0.133	0.072	0.522*	-0.055	-0.297	-0.208	-0.213	-0.187	-0.680**	-0.754**	-0.541*	-0.099
河道蜿蜒度	-0.173	0.082	0.518*	0.026	-0.154	-0.230	-0.093	-0.127	-0.523*	-0.418	-0.736**	-0.132
河岸稳定性	-0.123	-0.144	0.041	-0.123	-0.123	0.000	-0.082	0.083	-0.062	0.164	-0.185	0.185
河岸植被多样性	-0.352	-0.281	0.273	-0.402	-0.532*	-0.471	-0.480	-0.062	-0.587*	-0.366	-0.424	-0.305
河岸坡度	0.069	0.230	0.717**	-0.021	-0.234	-0.397	-0.151	-0.11	-0.632**	-0.695**	-0.624**	-0.061
滨岸带植被宽度	-0.058	0.044	0.444	-0.17	-0.355	-0.455	-0.286	-0.163	-0.647**	-0.777**	-0.589*	-0.255
人类干扰强度	0.094	0.124	0.345	0.203	-0.053	0.005	0.040	-0.324	-0.509*	-0.739**	-0.616*	-0.352
河道	-0.388	-0.126	0.378	-0.542*	-0.626**	-0.559*	-0.612*	0.008	-0.883**	-0.585*	-0.588*	-0.238
河岸	-0.054	0.065	0.643**	-0.179	-0.360	-0.421	-0.288	-0.056	-0.686**	-0.618*	-0.620*	-0.061
滨岸带	0.041	0.115	0.461	0.009	-0.219	-0.256	-0.145	-0.262	-0.610*	-0.842**	-0.660**	-0.229
IRHQ	-0.178	-0.016	0.516*	-0.335	-0.487	-0.473	-0.441	-0.045	-0.841**	-0.716**	-0.646**	-0.162

注*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$

3.2.3 生境特征与水质状况冗余分析

将水质指标作为响应变量,生境指标作为解释变量,对水质参数进行除趋势对应分析 (DCA),根据梯度长度确定排序模型。生境最长轴的梯度长度小于 3,因此选用 RDA 单峰模型。根据所确定的排序模型利用 Canoco for Windows 4.5 进行冗

余分析, 确定不同生境指标对河流水质变化影响的贡献率。从图 2 的冗余分析可以看出, 除生态水量满足程度和河岸稳定性, 其他 8 项生境质量指标与主要水体理化指标如 TN 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 和 COD 呈负相关, 与 DO 呈正相关, 对水质指标影响程度最高的生境指标是表观水质、河道生境多样性和河岸坡度。

4 讨论

4.1 河流生境评价指标适宜性

与自然条件相近的长江中下游平原河网地区相关研究结果比较, 苏州河全流域 34 个监测点中 16.8% 的生境质量等级为优或良, 83.2% 为中、差、劣等^[14]; 太湖流域宜兴片 42 个调查样点中, 11.9% 的河流生境质量等级为优或良, 57.1% 为中等, 28.6% 为差等, 2.4% 为劣等^[11], 本研究区内的人为活动干扰强度和水质污染程度均相对较低, 河流生境质量整体状况较好。虽由于实地调查时间限制, 该评价结果只代表调查时段的河流生境状况, 但还是可以反映出区域河流受自然与人类活动共同影响下的生境质量的优劣及不同河流生境状态差异。

4.2 河流水质与生境质量的相互影响

河流生境质量指标与水质指标的相关分析结果表明, 本研究构建的河道生境多样性、表观水质、河岸坡度等 8 项栖息地评价指标体系与该区对应河段的主要水质状况具有显著相关性, 表明该指标体系不仅能够反映河道栖息、地质量状况, 还能够一定程度上反映河道水质状况, 具有较好的适用性和科学性; 冗余分析表明表观水质、河道生境多样性和河岸坡度三项指标依次对水质指标具有较高影响, 其原因是河流水质状况与生境质量能够相互影响, 表现为河流水质状况直接影响河流水生生物的生存环境^[11], 而河道小生境的多样化有利于维持生物多样性, 提高水质净化能力^[28], 河岸坡度变化影响污染物截留效果^[29]。河道宽深比反映水体与底质接触面积, 影响底质发挥对污染物的吸附、转化作用^[30]。蜿蜒的河道能减缓河水流速, 使悬浮物得到沉降^[31], 河岸带植被能吸收水体氮磷营养元素, 减缓营养物质累积^[32]。人类活动干扰不仅通过排污直接影响水质, 还通过改变生境自然状况间接引起水质变化^[33]。

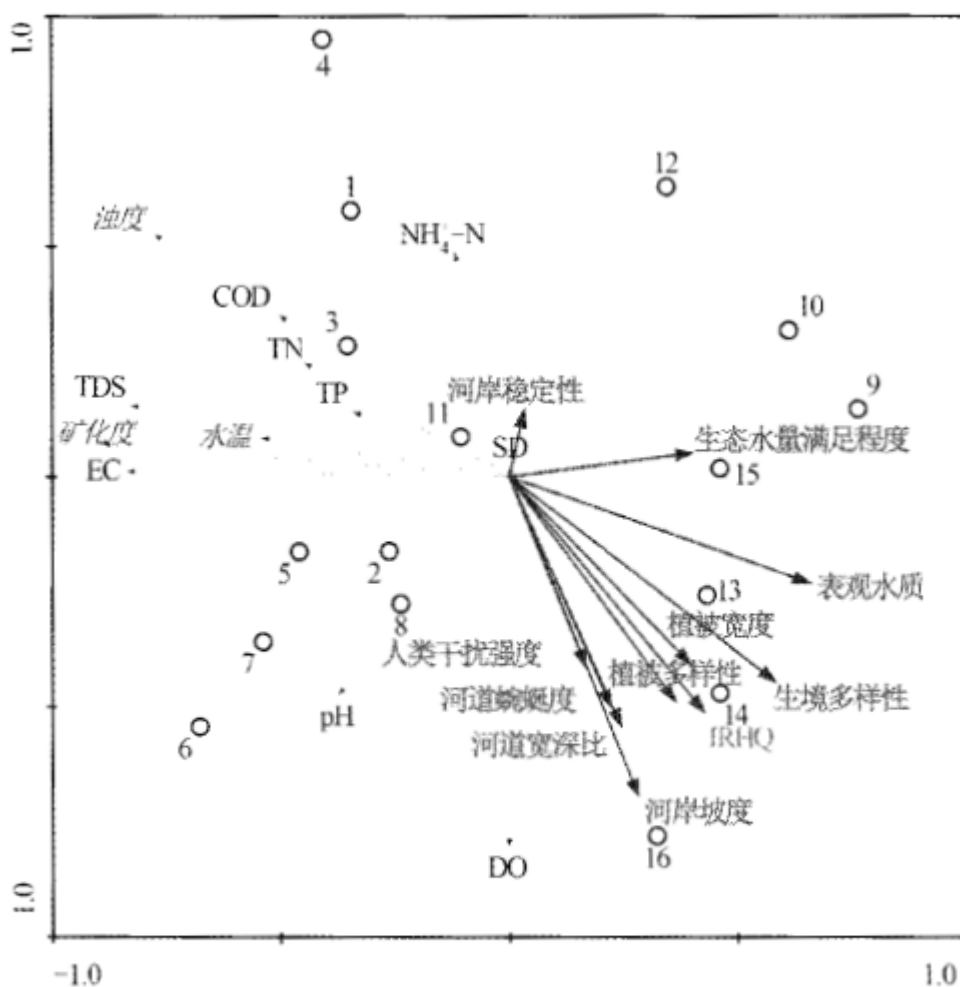


图2 生境质量与水质状况冗余分析

Fig.2 Redundancy Analysis of Habitat Quality and Water Quality Relationship

4.3 河流生境质量保护和恢复措施

调查发现，造成研究区河流水质污染的原因有：河流沿线部分工业及生活污水直接排入河道，城市污水截流和尾水收集系统不完善，山东过境“客水”对下游邳州的影响等。另外河流水系局部沟通不畅，自然形态受破坏，地下水超采，导致河道生境逐步退化。河岸植被品种单一，群落生态稳定性较差，闸站缺少生物通道，硬质直立护岸等问题使水陆交错带的生态功能和景观功能受损，区域水生态系统的环境缓冲能力下降。受石矿开采等因素影响，部分地区滨岸带水土流失有加剧的趋势。但人类活动并非只对生境质量产生负面影响，建设南水北调东线工程的清水通道，对河道进行清淤整治，改善水体流动性，重建河岸带植被等生态修复工程对河流生境质量提高有积极意义。

针对河流生境现状，采取以下保护和恢复措施：建设生态工业园区，新建并改造城镇污水处理厂，推进再生水回用和农村水环境连片整治，建立运河沿线区域尾水导流工程，削减污染物入河量。通过引沂河、中运河水进入邳州，引郑集南支河、南四湖上级湖水进入丰县，增加水体流动性和水环境容量，满足生态系统水量需求。实施南水北调中运河清水通道工程，对城区

河道进行清淤疏浚，改善水环境质量。建设生态净化工程，适量投放鲢鱼、螺等水生动物，构建水生生态系统食物链，在河道内种植水车前、金鱼藻等沉水植物，布设生态浮床，增加河湖自净能力，恢复河道生态系统和生境多样性。

发挥河岸污染物截留缓冲功能，降低河湖边坡，软化岸缘，根据河道水流速度，尽量利用木桩、竹笼、卵石等不同稳定性的天然材料修复，恢复河岸的自然属性。结合河流生态系统特征，采用 3—4 区河岸缓冲区生态治理模式，以乡土植物为主^[34]，从河道沿河岸向上依此种植水生植物区（营蒲、香蒲、慈姑、芦苇等），林木区（池杉等），灌林混合区（连翘、金钟、梅花等），草本植物区（香根草等），利用合理多样的植物种植搭配为生物提供良好的栖息环境。

在条件允许的河段，尽量增加滨岸带植被宽度，对河湖滨岸闲置及易流失区进行土地整理，补种植物，固土固堤，控制建筑、交通、农田用地等对滨岸带植被的侵占，恢复滨岸带的水土保持功能、生物栖息地功能及廊道功能。

5 结论

本文参考国内外相关研究，构建了适合南水北调东线工程徐州段的河流生境评价指标和方法，评价结果显示：

（1）研究区河流生境质量总体较好。16 个河段中生境质量等级为优和良的河段占 75%，其中质量等级为优、良、中、差、劣的河段比例分别为：50%、25%、6.25%、6.25%、12.5%，工日州河流总体状况好于丰县。

（2）河流生境综合评价指数与河流水体中 COD、TN、 NH_4^+-N 呈负相关，与 DO 呈正相关。河道生境多样性、景观水质、河道宽深比和河岸坡度等生境指标与水质有显著相关性，水质对生境质量有直接影响，河流生境质量的优劣也对入河污染物的截留削减有较大影响。

（3）河流生境综合指数评价结果真实反映了研究区的实际调查状况，在流域水生态管理中应控制人类活动对生境负面干扰，恢复河岸带植被完整性，发挥河岸带植被的污染物消减能力。

参考文献：

- [1] 王建华，田景汉，吕宪国．挠力河流域河流生境质量评价[J]．生态学报，2010，20（2）：481—486．
- [2] PARSONS M，NORRIS R．The effect of habitat specific sampling on biological assessment of water quality using a predictive model [J]．Freshwater Biology，1996，36（2）：419—434．
- [3] 王强，袁兴中，刘红，等．基于河流生境调查的东河河流生境评价[J]．生态学报，2014，34（6）：1545—1558．
- [4] 栾建国，陈文祥．河流生态系统的典型特征和服务功能[J]．人民长江，2004，35（9）：41—43．
- [5] 王琼，范志平，李法云，等．蒲河流域河流生境质量综合评价及其与水质响应关系[J]．生态学杂志，2015，34（2）：516—523．
- [6] 郑丙辉，张远，李英博．辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]．环境科学学报，2007，27（6）：928—936．

[7] BARBOUR MT , GERRITSENJ , SNYDER BD , et al . Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wade able Rivers: Periphyton , Benthic Macro invertebrates and Fish [M] . 2nd ed . Washington, DC : US Environmental Protection Agency , office of water 1 999 .

[8] U . 5 . Fish and Wildlife Service (USFWS) . Standards for the development of habitat suitability index models [M] . Washington, DC : Ecology Service Manual 103 , U . 5 . Fish and Wildlife Service , Division of Ecological Sciences , 1 98 1 .

[9] WHITE LJ , LADSON A R . An index of stream condition: user , s manual [M] . 2nd edition , Melbourne : Department of Natural Resources and Environment , 1 999 : 1 — 22 .

[10] PARSONSM , THOMSM , NORRIS R . Australian River Assessment System : Review of Physical River Assessment Methods — A Biological Perspective [M] . Monitoring River Health Initiative Technical Report Number 2 1 . Canberra : Commonwealth of Australia and University of Canberra , 2002 : 2 — 1 0 .

[11] 刘华, 蔡颖, 转梦秋, 等. 太湖流域宜兴片河流生境质量评价[J] . 生态学杂志, 20 12 , 31 (5) : 1258 — 1295 .

[12] 夏霆, 朱伟, 姜谋余, 等. 城市河流栖息地评价方法与应用[J] . 环境科学学报, 2007 , 27 (12) : 2095 — 2 1 04 .

[13] 左悼, 由文辉, 汪冬冬. 上海青浦区不同用地类型河流滨岸带生境及植物群落组成[J] . 长江流域资源与环境, 2011 , 20 (1) : 1 16 — 121 .

[14] 曹敏, 吴阿娜, 车越, 等. RBPs 在苏州河水系生境评价中的应用[J] . 华东师范大学学报(自然科学版), 2012 (3) : 130 — 137 .

[15] 董哲仁. 河流健康评估的原则和方法[J] . 中国水利, 2005 (10) : 17 — 19 .

[16] 杨爱民, 张璐, 甘乱, 等. 南水北调东线一期工程受水区生态环境效益评估[J] . 水利学报, 2011 , 42 (5) : 563 — 571 .

[17] 蔡邦成, 陆根法, 宋莉娟, 等. 南水北调东线水源地保护区生态建设的生态经济效益评估[J] . 长江流域资源与环境, 2006 , 15 (3) : 384 — 387 .

[18] 赵世新, 张晨, 高学平, 等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J] . 湖泊科学, 2012 , 24 (6) : 923 — 93 1 .

[19] 于少鹏, 孙广友, 孙雅萍, 等. 南水北调东线工程沿线湖沼湿地生态环境特征及退化分析[J] . 资源科学, 2005 , 27 (2) : 1 21 — 127 .

-
- [20] HUANGQ , GAO JF , CAI YJ , et al . Development and application of benthic macro invertebrate - based multimetric indices for the assessment of streams and rivers in the Taihu Basin , China [J] . Ecological Indicators , 20 14 , 48 : 649 — 659 .
- [21] 阮晓红, 朱维斌. 南水北调东线工程江苏段水污染防治对策研究[J] . 河海大学学报(自然科学版), 2002 , 30 (6) : 79 — 82 .
- [22] 胡永定, 韩宝平, 杜娟. 南水北调东线徐州段水环境现状及其污染防治对策[J] . 土壤, 2007 , 39 (3) : 483 碑 57 .
- [23] RAVEN PJ , HOLMES N TH , DAWSON FH , et al . River habitat survey in Britain and Ireland : field survey guidance manual : 2003 version [R] . London : Environment Agency , 2003 .
- [24] 孟伟, 张远, 渠晓东. 河流生态调查技术方法[M] . 北京: 科学出版社, 20 11 : 33 — 58 .
- [25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M] . 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002 .
- [26] 冯彦, 何大明, 杨丽萍. 河流健康评价的主评指标筛选[J] . 地理研究, 20 12 , 31 (3) : 359 — 395 .
- [27] 张远, 赵瑞, 渠晓东, 等. 辽河流域河流健康综合评价方法研究[J] . 中国工程学报, 2013 , 15 (3) : 11 — 18 .
- [28] 魏成, 刘平. 人工湿地污水净化效率与根际微生物群落多样性的相关性研究[J] . 农业环境科学学报, 2008 , 27 (6) : 2401 — 406 .
- [29] 吴建强. 不同坡度缓冲带滞缓径流及污染物去除量化[J] . 水科学进展, 20 11 , 22 (1) : 1 12 — 1 1 7 .
- [30] 王琼, 李法云, 范志平, 等. 大伙房水库入库河流物理生境评价及其对水质状况的影响[J] . 环境科学学报, 20 15 , 35 (9) : 2850 — 2859 .
- [31] 毛战坡, 尹澄清, 王雨春, 等. 污染物在农田溪流生态系统中的动态变化[J] . 生态学报, 2003 , 23 (12) : 26 14 — 2623 .
- [32] 赵同谦, 徐华山, 任玉芬, 等. 滨河湿地对农业非点源氮污染控制研究进展[J] . 环境工程学报, 2008 , 2 (11) : 1441 — 1446 .
- [33] 李怀恩, 李越, 蔡明, 等. 河流水质与流域人类活动之间的关系[J] . 水资源与水工程学报, 2004 , 15 (1) : 24 — 28 .
- [34] 陈明曦, 陈芳清, 刘德富. 应用景观生态学原理构建城市河道生态护岸[J] . 长江流域资源与环境, 2007 , 16 (1) : 97 — 1 01 .