

文章编号:1672-3031(2017)06-0478-07

基于水生态区的黑河流域水生态健康评价研究

杜飞, 王世岩, 刘畅, 王亮

(中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 本文以我国西北干旱区典型内陆河流域—黑河流域为例, 基于黑河流域水生态区划, 以“压力-状态-响应”(PSR)模型为基础, 构建了涵盖13个指标的流域水生态健康评价体系, 分析评价了流域内8个水生态区的健康状况。评价表明: 黑河流域水生态区中, 上游区域水生态健康状况较好, 中游次之, 中下游极差, 下游较差。主要是因为上游地区受到外在污染最轻、人为扰动相对最小; 中游地区人口密度相对较大, 农业活动等外在扰动相对较多; 中下游地区处于荒漠地区, 河流、湖库等水体缺乏; 而下游地区虽然人口数量少、水体受外来污染影响较小, 流域水生态健康性压力相对较轻, 但来水量相对不足、水生态系统栖息地条件极为脆弱, 致使水生生物栖息地安全状况较差。

关键词: 黑河流域; 水生态区; 水生态健康评价; PSR模型

中图分类号: X22

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.06.011

20世纪80年代, Schaeffer和Rapport首次提出生态系统健康的内涵和定量问题^[1-2], Costanza等^[3]从生态系统本身结构和功能出发提出了生态系统健康概念及标准, 将生态系统健康总结为6个方面: ①自我平衡; ②无疾病; ③多样性或复杂性; ④稳定性或恢复性; ⑤活力或成长性; ⑥系统组成成分之间维持平衡, 即健康的湖泊生态系统表现为物质循环、能量和信息流动未受到损害, 关键生态组分和有机组织完整且没有疾病, 受突发的自然或人为扰动后能恢复或保持原有的功能和结构, 整体功能表现出多样性、复杂性和活力。所谓“健康”就是指系统在各种不良环境影响中, 结构和功能保持相对稳定状态, 并具有可持续发展或不断完善特性^[4]。随着社会经济的不断发展, 流域开发、水利工程、水资源开发利用等方式造成河流水文情势、水质以及栖息地环境改变, 流域水生态系统异质性格局遭到破坏, 致使河流断流、湖泊萎缩、水体富营养化、水生生物数量骤减、湿地退化等水生态问题, 引起世界各国高度重视^[5]。2001年联合国组织世界多个机构制定并实施千年生态系统评估计划(MA: Millennium Ecosystem Assessment), 对全球生态系统的过去、现在、未来状况进行评估。2015年中国将生态文明建设纳入“十三五”规划当中, 建设生态文明、识别流域水生态健康及演变态势、保障流域水生态系统健康, 是水生态文明建设中的关键科学问题之一^[6]。但基于不同水生态区生态系统特征进行流域水生态健康评价方面的相关研究尚不多见。本文结合国内外对湿地、河流等生态系统健康评价的实践, 为了突出不同水生态区生态特征差异, 利用PSR(Pressure-State-Response)模型, 在黑河流域水生态区划分基础上, 对流域水生态系统健康进行了评价, 本研究将为流域水生态保护、水生态功能区划和干旱区水生态文明建设等提供相关研究基础。

1 研究区域概况

黑河流域是我国西北干旱地区第二大内陆河流域, 流域位于38°00'—42°00' N, 98°00'—

收稿日期: 2017-01-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-002-05)

作者简介: 杜飞(1992-), 男, 河南南阳人, 硕士, 主要从事遥感水文研究。E-mail: 1539099443@qq.com

通讯作者: 王世岩(1974-), 男, 山东济南人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事流域水生态功能分区、湿地生态、环境评价等研究。E-mail: wangsy@iwahr.com

101°30' E, 面积 $14.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 干流全长 821 km, 地跨青海、甘肃和内蒙古 3 省区。流域平均海拔 3 600 m, 相对高差 3 000 m 左右, 生态格局、气候状况具有明显的垂直地带性, 流域自然、社会环境特征分区明显, 流域可划分为上游祁连山山区水源涵养区、中游张掖地区人工农业绿洲区以及下游额济纳旗自然沙漠绿洲区^[8]。上游祁连山区和中游走廊区和年降水量分别为 300 ~ 500 mm 和 100 ~ 250 mm, 下游额尔济纳旗绿洲为荒漠极端干旱区, 降水量不足 45 mm, 流域分布有大小支流 30 多条, 均发源于祁连山, 多年平均水资源总量 41.73 亿 m^3 , 其中出山径流量 36.83 亿 m^3 。

近年来, 随着大规模的生产活动和不合理的开发利用, 导致黑河流域水生态健康状况日益严峻。诸多学者对于黑河流域水资源与生态变化以及水量平衡、地下水等方面开展较多研究^[7-8], 而对黑河流域水生态健康研究较少。本文基于黑河流域 8 个水生态区、构建了流域水生态健康评价指标体系, 对流域水生态健康进行了评估分析。

2 水生态区划分及特征分析

本文基于“十二五”水专项“黑河流域水生态功能分区研究”成果, 通过黑河流域水生态系统异质性特征识别, 针对干旱区内陆河流域特点, 开展水生态空间单元的划分, 之后对各水生态区水生态健康状况进行了评价。水生态分区是基于对流域水生态系统的区域差异研究, 不同类型区域生物区系、群落结构和水体理化环境的异同比较, 以及水生态系统空间格局和尺度效应分析而提出的一种分区方法^[9]。水生态区可以阐明水生环境系统在区域和地带等不同尺度上空间分异特征, 揭示水生态系统空间分布规律^[10-11]。

在黑河流域水生态分区中, 利用 CA、PCA 或 CCA 等分析技术, 以径流深度、植被覆盖度和地形起伏度为主要分区指标, 通过对分区指标空间预处理和无量纲归一化处理后, 利用 GIS 重采样分析技术和空间叠加功能对水生态区进行划分。同时, 结合 Arc Hydro 模块小流域提取技术, 得到小流域空间数据, 在此基础上利用流域植被数据、土壤数据和地貌类型数据进行水生态区边界的修正, 划分出 3 个黑河流域水生态一级区和 8 个水生态二级区(图 1)。

按照地名/河流名+陆地生态系统类型(地貌、土壤、植被、水文等)+水生态区进行命名。黑河流域各水生态区代码、名称及生态系统特征见表 1。RB I₁ 祁连山高山寒漠水源涵养水生态区; RB I₂ 祁连山中山草原水源涵养水生态区; RB II₁ 走廊北山冲积平原灌丛荒漠水生态区; RB II₂ 黑河缓倾斜平原绿洲农业水生态区; RB II₃ 北大河缓倾斜平原绿洲农业水生态区; RB II₄ 走廊西北沙漠戈壁水生态区; RB III₁ 黑河下游额济纳居延三角洲水生态区; RB III₂ 阿拉善高原戈壁荒漠水生态区。

3 指标体系及评价方法

3.1 水生态健康评价框架及指标体系 根据水生态健康评价需求, 结合国内外相关研究及生态系统健康评价指标, 综合考虑黑河流域干旱区特点, 构建出流域水生态健康评价指标体系。水生态健康不仅需要对流域水生态环境健康状况评价, 而且还需要全面反映对生态安全有潜在影响的重要因素

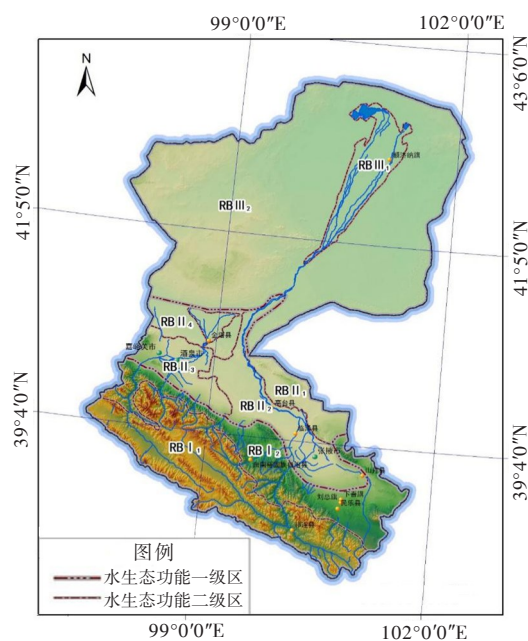


图 1 黑河流域水生态区划分

表1 黑河流域水生态区生态系统特征

一级分区	二级分区	生态系统特征				
		生态系统类型	地貌特征	河湖水质特征	河岸带/湖滨带特征	土地利用特征
祁连山山区河流水源涵养水生态区	RB I ₁	高山草甸、高寒草原生态系统	高海拔山地、冰川为主，垂直地带性明显，海拔相对较高	水质优良	草地、林地	草地、未利用地
	RB I ₂	草地生态系统、森林生态系统	中海拔起伏山地为主，海拔相对较高	水质良好	草地、林地	草地、未利用地及林地
	RB II ₁	荒漠生态系统	主要为中海拔干燥洪积平原、剥蚀台地	—	—	耕地为主
	RB II ₂	以人工灌溉绿洲农业生态系统、荒漠草原生态系统为主	主要为缓倾斜平原，地势平坦开阔，走廊平原分布农业灌溉绿洲	部分河段水体受到生活污水等影响	耕地、草地	耕地、未利用地
河西走廊绿洲平原河流水量供给水生态区	RB II ₃	人工灌溉绿洲农业生态系统、荒漠生态系统	缓倾斜平原，地势平坦开阔，分布农业灌溉绿洲	主要污染因子为总氮、高锰酸盐指数	耕地、草地	未利用地、耕地
	RB II ₄	荒漠生态系统	干燥洪积平原、沙漠、戈壁地貌景观	—	—	未利用地
	RB III ₁	荒漠绿洲生态系统为主	为额济纳河冲积平原三角洲，地势平坦	水质较好	林地、草地	未利用地、草地和林地
甘蒙戈壁荒漠平原河流生境维持水生态区	RB III ₂	荒漠生态系统	主要为阿拉善高平原、干燥洪积平原	水质总体满足Ⅲ类	湖滨带以近自然状态为主	未利用地为主

变化和水生态系统响应特征。因此，水生态健康问题是流域水生态系统的“压力-状态-响应”(PSR)(图2)的综合状况，其中压力指标主要反映在人类活动对生态环境直接或间接的改变，状态指标主要表现为在压力影响下人和自然环境所呈现出的状态，响应指标包括生态系统和人类为克服外在扰动所产生的反应。

根据黑河流域特点及野外水生态系统调查、河流水质监测以及相关统计数据，利用“压力-状态-响应”特征分析，构建了由目标层、准则层、状态层和指标层组成的4级层次的水生态健康评价框架及指标体系(图3)。其中，目标层反映流域水生态健康总体水平，代表着维护健康河流、促进人水和谐的总体态势和总体效果；准则层方面依据PSR模型，按内部逻辑关系系统地表述为压力、状态、响应3个方面；状态层方面是在每一个准则层下设置能够代表系统状态的指标，对应准则层的设计；指标层表示各个状态层要素指标，主要采用可以获得的定量化指标或半定量指标以反映河流健康状况。

3.2 指标的选取原则与量化 根据近些年来国内外实践表明，指标选择应遵循以下原则：①全面性，即可以综合全面地反映整个水生态系统健康状况；②可行性，即指标具有采集的可实施性，并切合实际情况；③独立优先性，即各指标间相互独立、可量化，并非将所有与生态健康有关的指标纳入评价体系当中，要优先选择对流域生态健康影响权重大的指标。

本文采用极差标准化，在指标归一化处理中，考虑了指标变化趋势对于水生态系统的影响差异。对于指标数值越大，代表水生态系统状态越好的指标，直接对指标进行归一化处理，而指标数值越大，代表水生态系统状况越差的指标，则利用公式将进行相应转变，以体现各指标变化方向的同向性，使得评价指标最大，表明该水生态区的水生态健康状况越好。指标归一化公式如下。

$$X'_i = (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}); X'_i = 1 - (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})$$

式中： X'_i 为第*i*个指标的标准化值； X_i 为第*i*个指标的初始值； X_{imin} 、 X_{imax} 分别为第*i*个指标在研究区

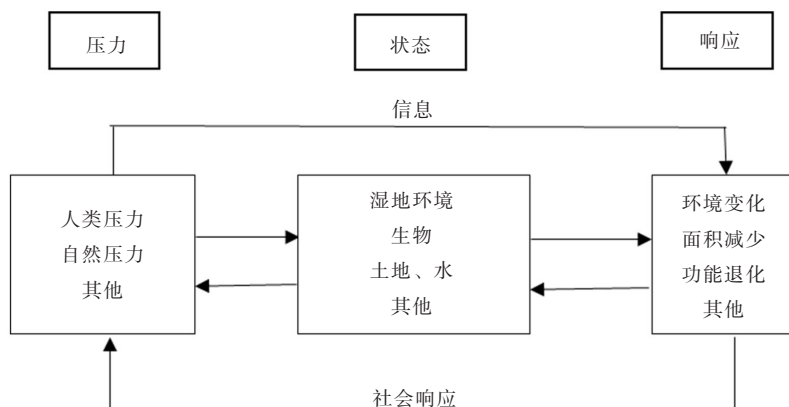


图2 “压力-状态-响应”模型

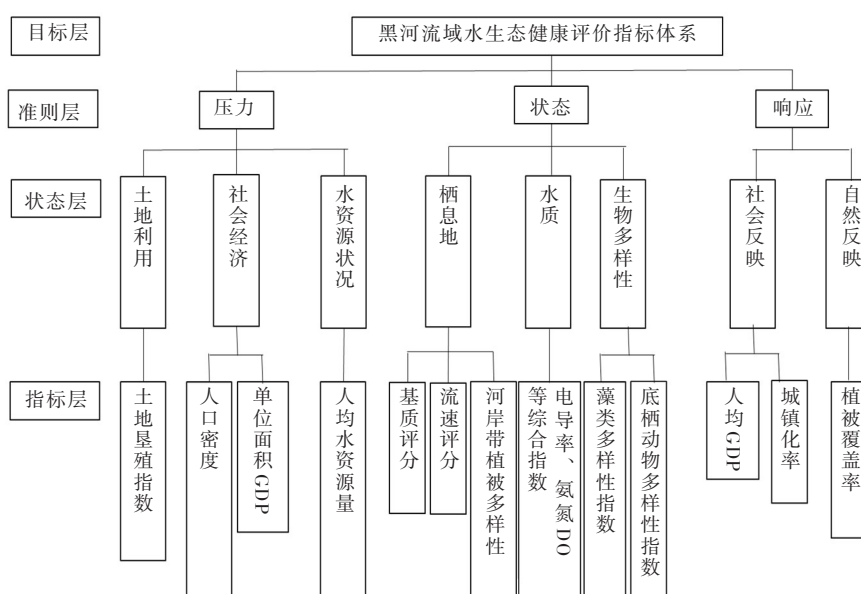


图3 黑河流域水生态健康评价框架及指标

内的最小值和最大值。

经标准化和归一化之后，各水生态区的指标评分如表2所示。

3.3 指标权重确定 由于不同指标对于流域水生态健康表征特征不同，因此在进行水生态健康评价之前需首先确定各个指标权重。

综合比较指标权重确定方法，层次分析法(AHP, the Analysis Hierarchy Process)由于适用范围广，可操作性强，在国内应用较广^[12-14]。在黑河流域水生态健康评价中，利用构建的水生态健康评价指标体系，首先通过专家打分，利用层次分析法进行指标权重的初步确定后，之后再通过专家咨询、协调，最终确定各个指标的权重值(表3)。

3.4 评价方法 参考国内外相关研究方法^[15-16]，根据构建的评价指标体系，按照由准则层、状态层和指标层组成的水生态健康综合评价内容，依据从上到下逐层整合的方法，建立黑河流域水生态健康评价指数计算模型。建立的流域水生态健康评价指数计算公式如下：

$$EHIC = \sum_{i=1}^n W_i \times I_i$$

式中： $EHIC$ 为流域水生态健康评价指数值，其值的大小在0~1之间； W_i 为评价指标在综合评价指标体系中的权重值，其值的大小在0~1之间； I_i 为评价指标的归一化值，其值大小在0~1之间。

表2 各水生态区评价指标评分

水生态区	RB I ₁	RB I ₂	RB II ₁	RB II ₂	RB II ₃	RB II ₄	RB III ₁	RB III ₂
土地垦殖指数	0.725	0.687	0.993	0.476	0.000	0.947	0.987	1.000
人口密度	0.016	0.20	0.002	0.620	1.000	0.001	0.017	0.000
单位面积GDP	0.005	0.084	0.004	0.388	1.000	0.003	0.018	0.000
人均水资源量	1.000	0.894	0.199	0.504	0.596	0.050	0.241	0.000
基质评分	1.000	0.714	-	0.429	0.429	-	0.143	0.000
流速评分	1.000	0.929	-	0.714	0.714	-	0.286	0.000
河岸带植被多样性	0.929	0.857	-	0.786	0.571	-	0.286	0.143
电导率、氨氮、DO等综合指数	0.785	0.756	-	0.708	0.798	-	0.772	0.722
藻类多样性指数	0.120	0.360	0.000	0.387	0.390	0.000	0.261	0.402
底栖动物多样性指数	0.000	0.119	0.000	0.112	0.000	0.000	0.000	0.136
人均GDP	0.877	0.627	0.602	0.648	0.725	0.906	0.000	1.000
城镇化率	1.000	0.893	0.964	0.893	0.000	0.893	0.357	0.821
植被覆盖率	0.820	0.734	0.000	0.024	0.025	0.001	0.098	0.015

表3 黑河流域水生态健康评价指标权重

准则层	权重	状态层	权重	指标层	权重
压力	0.349	土地利用	0.087	土地垦殖指数	0.087
		社会经济	0.207	人口密度	0.104
		水资源状况	0.055	单位面积GDP	0.104
				人均水资源量	0.055
状态	0.484	栖息地	0.151	基质评分	0.05
				流速评分	0.05
				河岸带植被多样性	0.05
		水质	0.095	电导率、氨氮、DO等综合指数	0.095
		生物多样性	0.239	藻类多样性指数	0.12
				底栖动物多样性指数	0.12
响应	0.167	社会反映	0.113	人均GDP	0.057
				城镇化率	0.057
		自然反映	0.056	植被覆盖率	0.056

4 评价结果与分析

4.1 水生态健康综合评分 流域水生态区水生态健康综合评分结果见表4。可以看出，自上游到下游，水生态健康评分依次降低(中游地区的走廊北山冲积平原灌丛荒漠水生态区(RB II₁)、走廊西北沙漠戈壁水生态区(RB II₄)除外)。上游水生态区(祁连山高山寒漠水源涵养水生态区(RB I₁)、祁连山中山草原水源涵养水生态区(RB I₂))的水生态健康评分结果较好，中游地区(黑河缓倾斜平原绿洲农业水生态区(RB II₂)、北大河缓倾斜平原绿洲农业水生态区(RB II₃))的水生态健康评分一般，而下游地区(黑河下游额济纳居延三角洲水生态区(RB III₁)、阿拉善高原戈壁荒漠水生态区(RB III₂))水生态健康评分则较差。其中，中下游地区的走廊北山冲积平原灌丛荒漠水生态区(RB II₁)和走廊西北沙漠戈壁水生态区(RB II₄)的水生态健康评分分别为0.000、0.009，这与该地区为荒漠戈壁、环境恶劣、水资源量稀少、生态系统脆弱、类型单一的情形是一致的。

4.2 水生态健康综合评价结果 对黑河流域水生态健康状况进行分级，划分为5个等级，分别为相对良好、相对较好、相对一般、相对较差、相对极差，对应的综合指数分别为：0.8~1.0、0.6~0.8、

0.4~0.6、0.2~0.4、0~0.2。各水生态区健康状况评价结果见表5所示。

表4 黑河流域不同水生态区水生态健康综合评分

一级区	二级区	水生态健康综合评分	排序
RB I	祁连山高山寒漠水源涵养水生态区(RB I ₁)	0.752	1
	祁连山中山草原水源涵养水生态区(RB I ₂)	0.707	2
RB II	走廊北山冲积平原灌丛荒漠水生态区(RB II ₁)	0.000	8
	黑河缓倾斜平原绿洲农业水生态区(RB II ₂)	0.493	4
	北大河缓倾斜平原绿洲农业水生态区(RB II ₃)	0.545	3
	走廊西北沙漠戈壁水生态区(RB II ₄)	0.009	7
RB III	黑河下游额济纳居延三角洲水生态区(RB III ₁)	0.330	5
	阿拉善高原戈壁荒漠水生态区(RB III ₂)	0.186	6

表5 水生态健康综合评价结果

健康等级	I	II	III	IV	V
健康状况	相对良好	相对较好	相对一般	相对较差	相对极差
综合指数	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
各功能区健康情况	-	RB I ₁ 、 RB I ₂	RB II ₂ 、 RB II ₃	RB III ₁	RB III ₂ 、RB II ₄ 、 RB II ₁

由以上结果可以看出：(1)流域上游地区的祁连山高山寒漠水源涵养水生态区(RB I₁)、祁连山中山草原水源涵养水生态区(RB I₂)2个地区水生态健康相对较好，主要是流域上游地区受到外在污染最轻、人为扰动相对最小；(2)流域中游地区的黑河缓倾斜平原绿洲农业水生态区(RB II₂)、北大河缓倾斜平原绿洲农业水生态区(RB II₃)水生态健康性相对一般。由于区域人口密度相对较大，农业活动等外在扰动相对较多，对水生态健康性影响较大，水生态健康性相对一般；(3)中下游地区的走廊北山冲积平原灌丛荒漠水生态区(RB II₁)、走廊西北沙漠戈壁水生态区(RB II₄)、阿拉善高原戈壁荒漠水生态区(RB III₂)3个地区处于合黎山、龙首山及走廊北山的荒漠地区，基本没有河流、湖库等水体，植被覆盖度低、水资源匮乏、沙漠化程度高，因而水生态健康性表现相对极差；(4)黑河下游额济纳居延三角洲水生态区(RB III₁)处于流域下游地区，该区域人口减少，受外来污染较轻，流域水生态健康性压力相对较轻，但因河流上中游来水相对不足，经常性河道断流、水生态系统栖息条件脆弱且易于受到扰动，因此水生态健康性相对较差。

5 结语

水生态健康评价在一定程度上通过评价指标量化了人类活动对自然的影响，较好的反映了流域水生态现状，是流域生态治理的基础性工作，也为生态文明建设提供了科学支持。黑河流域水生态区水生态健康评价结果表明，对于西北内陆河流的生态健康状况除了与自身的自然环境条件有关外，还与人口增加和农业生产压力等外在扰动有着密切的关联。目前黑河流域面临着水资源短缺和生态退化等水生态健康威胁，合理配置水资源、科学安排生产、生活以及生态用水是流域水资源合理开发利用的核心。因此，严格按照国务院批准的黑河流域水资源分配方案，确保河流生态水量下泄。从流域层面来看，黑河流域生态需水对流域水生态健康保障具有重要意义，应在保障河道生态流量的基础上，注重生物多样性和栖息地的保护。为此需要加强上游水源涵养林草建设，保障水源涵养功能，保护流域水生生物，维护水生态系统的多样性。在水生态健康状况极差的中下游荒漠地区应采取相应的措施防风固沙、植树造林，加强流域荒漠植物的生态保护，加强中游区域的湿地保护等措施。同时，加强以水生态功能区为单元的水生态保护和管理，促进流域水生态文明建设。

参 考 文 献:

- [1] SCHAEFER D J, HENFICKS E E, KERSTER H W . Ecosystem health: I . Measuring ecosystem health[J] . Environmental Management, 1988, 12(4): 445-455 .
- [2] RAPPORT D J . What constitutes ecosystem health?[J] . Perspectives in Biology and Medicine, 1989, 33(1): 120-132 .
- [3] COSTANZA R, NORTON B G, HASKELL B D . Ecosystem health: new goals for environmental management [J] . Ecosystem Health New Goals for Environmental Management, 1992 .
- [4] 龙笛, 张思聪 . 滦河流域生态系统健康评价研究[J] . 中国水土保持, 2006(3): 14-16 .
- [5] LAMPERT W, SOMMER U . Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams(Second Edition)[M] . Oxford University Press Inc . , New York, 2007 .
- [6] 王世岩, 毛战坡, 刘畅, 等 . 基于水生生态区的黑河流域水生态安全评价研究[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(1): 24-30 .
- [7] 郑丙辉, 田自强, 李子成 . 黑河流域土地覆盖变化与生态环境退化过程分析[J] . 干旱区资源与环境, 2005, 19(1): 62-66 .
- [8] 王根绪, 程国栋 . 近 50 年来黑河流域水文及生态环境变化[J] . 中国沙漠, 1998, 18(3): 233-238 .
- [9] 孟伟, 张远, 郑丙辉 . 辽河流域水生态分区研究[J] . 环境科学学报, 2007, 27(6): 911-918 .
- [10] 梁静静, 左其亭, 夏军, 等 . 水生态区划理论方法及全国水生态区划方案[J] . 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 47-51 .
- [11] 孙然好, 汲玉河, 尚林源, 等 . 海河流域水生态功能一级二级分区[J] . 环境科学, 2013, 34(2): 509-516 .
- [12] 杨丽娜 . 大辽河口生态系统健康评价指标体系与技术方法研究[D] . 青岛: 中国海洋大学, 2011 .
- [13] 张蕾 . 东辽河流域水生态功能分区与控制单元水质目标管理技术[D] . 吉林: 吉林大学, 2012 .
- [14] 刘孝富, 邵艳莹, 崔书红, 等 . 基于 PSFR 模型的东江湖流域生态安全评价[J] . 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 197-205 .
- [15] 王远坤, 夏自强, 曹升乐 . 水安全综合评价方法研究[J] . 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 618-621 .
- [16] 左其亭, 陈豪, 张永勇 . 淮河中上游水生态健康影响因子及其健康评价[J] . 水利学报, 2015, 46(9): 1019-1027 .

Assessment of water ecological health based on aquatic ecoregions in the Heihe River Basin

DU Fei, WANG Shiyan, LIU Chang, WANG Liang

(Department of Water Environment, IWHR, Beijing 100038, China)

Abstract: This study presents an analysis of health status for aquatic ecoregions in the Heihe River Basin, a typical example of inland river basin in arid areas of northwest China. The basin was divided into eight aquatic ecoregions according to their aquatic ecological function regionalization at watershed scale. To evaluate water basin ecological health condition, a 13-indicator system was established based on "pressure-state-response"(PSR) model. The results shows that upstream area presents relatively good condition of ecological health, followed by middle reaches and downstream reaches, while middle and lower reaches presents extremely poor health condition. The reasons include that the upstream region receives the lowest external pollution and artificial disturbance, while middle area is influenced by relatively large population densities and intense agricultural activities. The middle and lower reaches are located in the desert region without rivers and reservoirs. Although the downstream region has lower population and fewer external contamination, the relatively insufficient influent and fragile water ecosystem habitat conditions lead to a poorer hydrobiology habitat security in this area.

Keywords: Heihe River Basin; aquatic ecoregion; water ecological health assessment; PSR model

(责任编辑: 韩 昆)