

◆全流域生态环境治理◆

永定河流域健康评估及其变化分析^{*}刘子钰¹, 任良锁^{1,2}, 白乙娟¹, 赵银军², 丁爱中^{1**}, 李红兵³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 南宁师范大学地理科学与规划学院, 广西南宁 530100; 3. 昆明柴石滩地区水资源管理局, 云南昆明 652100)

摘要:人类社会的高速发展导致流域水资源短缺和水环境污染等问题日益严重。永定河流域作为海河流域的重要组成部分, 流经内蒙古、山西、河北、北京、天津 5 个省(自治区、直辖市), 其健康发展状况对所在地区具有重要影响并值得深入研究。本研究在综合分析国内外流域健康评价方法的基础上, 构建永定河流域健康评价指标体系, 采用综合指数评价法和层次分析法对永定河流域 18 个子流域 2005-2020 年的健康状况进行评价。研究表明, 永定河流域在 2005-2020 年整体健康状况无明显变化, 个别子流域健康状况在前期有小幅度恶化的现象, 但整体在 2020 年得到改善。通过分析流域健康变化原因认为, 水资源量匮乏、经济发展不平衡以及人类活动剧烈干扰是导致永定河流域健康状况一般及局部恶化的主要原因, 并据此给出了永定河流域健康管理的对策和建议, 为永定河流域的合理开发利用与保护提供参考。

关键词:永定河 层次分析法 流域健康 生态系统 人类活动

中图分类号: X822 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2022)03-0482-09

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20220720.011

随着人类社会的进步, 工业化城镇化进程加快, 社会经济发展和环境保护之间的矛盾愈演愈烈, 尤其是流域水环境水生态问题^[1]。水域被污染或破坏, 相关的水生生物、河岸带动植物、水域周边土壤等都会受到影响, 这将导致破坏向整个流域蔓延^[2]。因此, 对流域健康的研究变得十分重要。

在流域健康研究方面, 西方国家要早于我国。

1997 年, Meyer^[3]首次提出“流域健康”的概念, 他认为健康的流域除了能够对其本身的结构与功能进行维持外, 还应产生一定的社会价值。之后, 国外学者一直尝试从更多影响流域健康的环境因素出发, 进一步深入研究流域健康, 如 2021 年伊朗学者 Mosaffaie 等^[4]采用 DPSIR 模型与 Friedman 测试, 将地下水资源损失、洪水潜力和土壤侵蚀率列为流域面临的重要

收稿日期: 2022-02-21

^{*} 北京市自然科学基金项目(Z170004), 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室(南宁师范大学)开放或系统基金项目(NNNU-KLOP-K1932)和广西科技计划项目(桂科 AD19110140)资助。

【作者简介】

刘子钰(1998-), 女, 硕士, 主要从事流域健康评价研究, E-mail: 745043958@qq.com。

【**通信作者】

丁爱中(1969-), 男, 教授, 主要从事水生态修复和水环境治理研究, E-mail: ading@bnu.edu.cn。

【引用本文】

刘子钰, 任良锁, 白乙娟, 等. 永定河流域健康评估及其变化分析[J]. 广西科学, 2022, 29(3): 482-490.

LIU Z Y, REN L S, BAI Y J, et al. Health Assessment and Change Analysis of Yongding River Basin [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(3): 482-490.

挑战。国内学者们也使用不同的研究方法对流域健康进行评估。张金艳^[5]采用 Flow Health 模型对大通河流域水文健康进行评价,并对主要控制断面进行流量计算。蒋衡等^[6]基于 PSR 模型,构建磁湖流域健康评价体系,并用健康评价指数(CED)评价磁湖流域健康状况。总的来说,健康的流域是指环境良好的、在不良环境中具有一定的自我修复能力的、可持续发展并且可以造福人类的流域。

分析国内外学者对流域健康评价所进行的研究可以看出,一方面,学者们对于流域的划分较为粗略,影响了评价精度;另一方面,学者们大都重点分析研究流域某一年的健康状况,对其多年变化情况的分析较少。本研究拟按照地形和气候等因素将永定河流域划分为多个子流域,并结合永定河流域的人口、经济、环境、资源、地下水、气象水文等资料,建立永定河流域健康评价体系;同时,依据 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 4 年的数据及评价指标,对永定河流域进行健康评价,分析其健康变化情况;最后,在健康评价的基础上,深入分析影响永定河流域健康的因素,为永定河流域的合理开发利用与保护提出对策和

建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

永定河流域经纬度为 $112^{\circ}00' - 117^{\circ}45' E$, $39^{\circ}00' - 41^{\circ}20' N$,发源于内蒙古高原南缘和山西高原的北部。流域地跨内蒙古、山西、河北、北京、天津 5 个省(自治区、直辖市),总面积 4.7万 km^2 (图 1),是海河流域七大水系之一,也是我国北方典型缺水型流域^[7]。永定河流域上游主要由洋河和桑干河两大支流组成,两大支流在河北怀来县汇流后称为永定河,经官厅山峡于三家店进入华北平原^[8]。永定河流域西北部植被覆盖率低,水土流失严重;三家店出山后为华北平原地区,植被覆盖率相对较高。流域位于干旱和湿润气候的过渡带,属中纬度大陆性季风气候,四季分明。近年来永定河流域的气温出现了非常明显的上升趋势,蒸发能力有轻微的下降趋势^[9]。流域内多年平均降水量为 420mm ,但年际变化很大,最多可达 1400mm ,最少仅 200mm ^[10]。

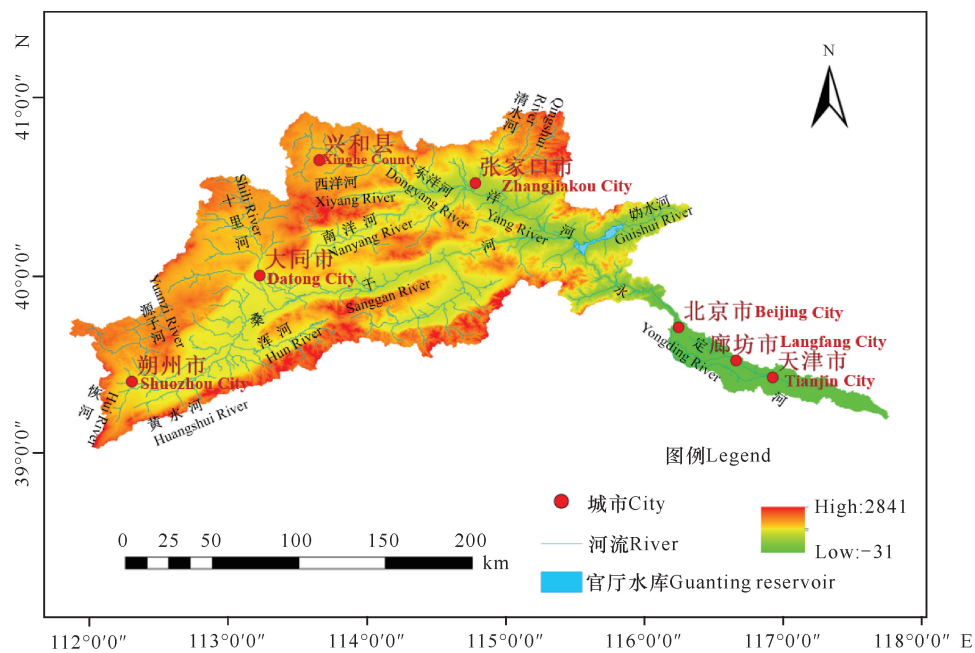


图 1 永定河流域地理位置

Fig. 1 Geographical location of Yongding River Basin

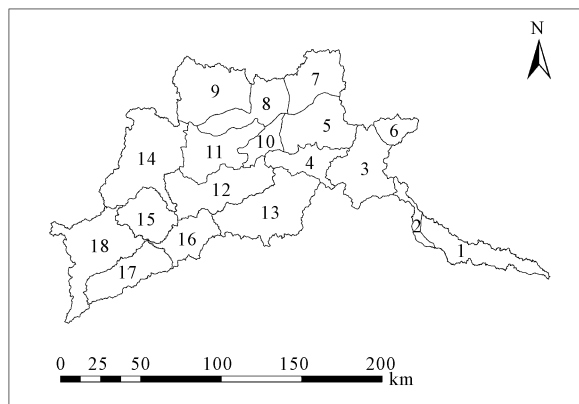
人类活动使永定河流域健康状况受损严重,尤其是中下游流域,这些流域人口密度大且流域面积小,其人均水资源量严重不足,甚至出现用水量大于水资源总量的情况,需要跨流域调水来满足日常生活。其中官厅水库的年入库径流量自 1950 年起呈现连续下

降趋势,河流水量较小,常年细水,2009 年甚至降至 0.2亿 m^3 。桑干河、洋河、永定河山峡段入库水量严重减少,全年减少量为 $17.36\% - 67.98\%$,山区水资源开发强度高达 97% ,地表水达 89% ,农业用水占总用水量的 69.3% ,用水比例不协调^[11]。

1.2 方法

1.2.1 子流域划分方法

武海霞等^[12]在对子流域划分方法的研究中发现,子流域划分的数量及面积对研究结果的差异影响较为显著,而地形复杂、坡度较大的区域对研究结果的准确性也会产生一定影响。但当子流域划分的数量达到一定水平时,对研究结果的准确性影响较小。因此,为了使永定河流域健康状况评价更加客观,本研究利用 ArcGIS 软件并依据永定河流域内的气候和地理条件,将研究区域划分为 18 个子流域(图 2)。对 18 个子流域分别进行流域健康评价,得出各子流域的评分后再利用综合指数评价法进行计算,从而得出永定河全流域的最终评价结果。



The number 1–18 in the figure represent 18 sub-basins, respectively

图 2 子流域划分图

Fig. 2 Sub-basin division map

1.2.2 评价指标体系构建

根据永定河流域的现状和流域健康的表现形式,

表 1 永定河流域健康评估指标体系

Table 1 Yongding River Basin health assessment index system

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	准则层权重 Criterion layer weights	指标层 Indicator layer	指标层权重 Indicator layer weights
Yongding River Basin	Land area	0.5	Forest cover rate	0.25
			Landscape fragmentation	0.25
			Water conservation function index	0.25
			Human activity intensity index	0.25
	Water area	0.3	Annual runoff	0.5
			Intensity of water resources development and utilization	0.5
	Economic society	0.2	GDP per capita	0.4
			Industrial output modulus	0.3
			Agriculture as a share of GDP	0.3

本研究选取陆域、水域、经济社会 3 个一级指标,并依据与各一级指标相关的主要影响因素,将森林覆盖率、水资源开发利用强度、人均 GDP 等 9 项因素作为二级指标,以此构建评价指标体系,如表 1 所示。其中,陆域层指标主要反映当地的地理特征、人类活动强度以及植被覆盖度等情况;森林覆盖率可以反映当地气候调节、水土保持的能力,水源涵养功能则能在一定程度上体现生态系统对水分循环利用和河流径流量调节的能力,而景观破碎度则反映出人类活动对当地环境的破坏^[13]。水域层指标主要反映径流量以及水资源量等情况,水资源开发利用强度和年径流量的变化情况都可以反映出流域内水文状况、流量大小以及水资源利用率等问题。经济社会层指标主要反映经济发展对环境的负面影响程度;人均 GDP 能够反映当地的经济技术发展水平,工业产值模数和农业占 GDP 比重也能够反映流域内的经济结构以及生产生活方式^[14]。

在对永定河流域进行健康评价时,首先应确定准则层各指标的权重;然后根据层次分析法综合评价指标层所有的二级指标,并根据各二级指标的计算结果评价准则层的 3 个一级指标;最后根据各一级指标权重,利用综合指数评价法计算得出永定河流域的整体健康状况。其中土地利用类型的相关数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,水文数据来源于海河流域水文年鉴与水利部监测网站,经济人口数据来源于各省市的统计年鉴,选取数据年份为 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年。在参考相关研究的基础上,采用专家打分法和层次分析法确定各指标的权重分配^[2],权重赋值情况见表 1。

1.2.3 评价方法与标准

本次评价采用综合指数法进行。以各子流域为评价单元,首先根据各二级指标的数据计算得出相应的结果,利用计算结果对其健康状况进行打分,再根据权重分配计算出每个一级指标的分值;然后通过准则层陆域、水域和经济社会的健康指数加权求和,获得各单元的流域健康综合评价指数(WHI)。流域健康综合评价指数计算如下:

$$WHI = I_L W_L + I_W W_W + I_E W_E,$$

式中: I_L 为陆域健康指数值, W_L 为陆域健康指数权重; I_W 为水域健康指数值, W_W 为水域健康指数权重; I_E 为经济社会健康指数值, W_E 为经济社会健康指数权重。 I_L 、 I_W 和 I_E 分别由各自的二级指标加权获得。

根据 2020 年方云祥^[15]对安徽省典型流域的健康等级划分以及流域健康评价综合指数、各项指标分值大小,将流域健康等级分为五级,分别为优秀($WHI \geq 80$)、良好($60 \leq WHI < 80$)、一般($40 \leq WHI < 60$)、较差($20 \leq WHI < 40$)和差($WHI < 20$)。

2 结果和分析

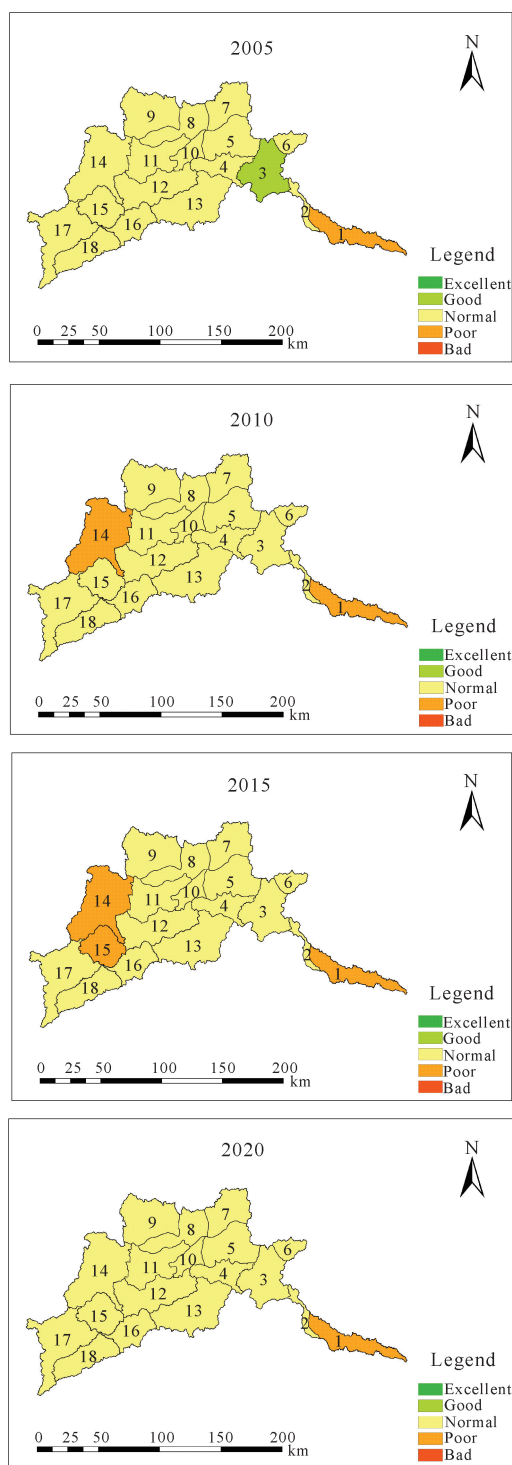
2.1 永定河流域健康等级

利用 ArcGIS 软件绘制永定河 18 个子流域的健康等级图(图 3)。由图 3 可以看出,永定河流域整体上处于一般的健康等级,2005-2020 年健康情况无明显变化,但个别子流域有环境恶化的趋势。2005-2010 年,流域 3 健康等级由良好降为一般,流域 14 的健康等级由一般降为较差;2010-2015 年,流域 15 的健康等级由一般降为较差;流域 1 的健康等级一直较差,其余子流域的健康等级均稳定在一般水平。但是从 2020 年的评价结果来看,流域健康状况有好转迹象,流域 14、流域 15 健康等级均回升到一般水平。

2.2 永定河流域健康状况

利用评价指标的各类相关数据,经过计算后得出准则层中各一级指标的结果。然后根据评价标准进行赋分,绘制出 2005-2020 年永定河流域一级指标的健康状况变化趋势,如图 4 所示。

陆域方面:2005-2020 年,各子流域间的健康状况有较为明显的差别,其中流域 1 的得分严重偏低,而流域 3 的得分明显高于其他子流域;除流域 8 和流域 9 外,其他子流域在各年份的健康状况变化趋势较为统一;流域 8 和流域 9 的得分在 2020 年有较明显



The number 1-18 in the figure represent 18 sub-basins, respectively

图 3 永定河流域 2005-2020 年健康综合评价结果

Fig. 3 Comprehensive health evaluation results of Yongding River Basin from 2005 to 2020

的提高[图 4(a)]。水域方面:2005-2015 年大部分子流域得分没有明显变化,而流域 3 的得分呈现明显下降趋势,流域 1 和流域 2 的得分则有小幅度提高;

但在 2015 - 2020 年, 大部分流域的水域状况明显改善, 可见流域环境治理工作取得了一定成效[图 4 (b)]. 经济社会方面: 各子流域的得分大多处于连续下降的趋势, 尤其是流域 7 和流域 8, 得分下降幅度较为明显[图 4(c)]. 结合陆域、水域和经济社会三项一级指标的计算结果, 最终可得出各子流域的健

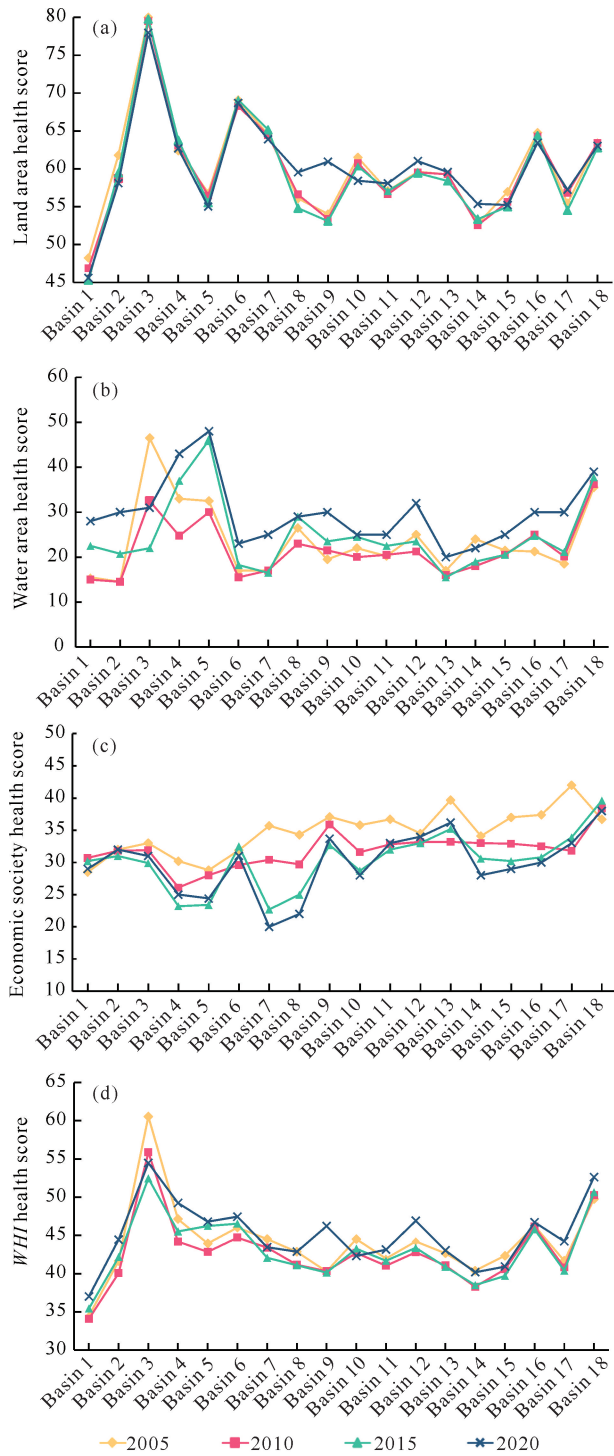


图 4 永定河流域健康状况变化情况

Fig. 4 Changes of health status in Yongding River Basin

康综合评价指数(WHI)。如图 4(d)所示, 2005 - 2015 年, 流域 3 的得分有较明显的下降趋势, 另有小分子流域的健康状况也有下降趋势, 但变化不明显; 2015 - 2020 年, 一些子流域的健康状况有所改善, 例如流域 9、流域 12、流域 14 和流域 17 等。

2.2.1 陆域健康状况

在陆域方面, 森林覆盖率和水源涵养功能指数得分较低且差异较大, 反映出评估流域森林覆盖度较低、生态结构稳定性较差、环境不良等问题(图 5)。

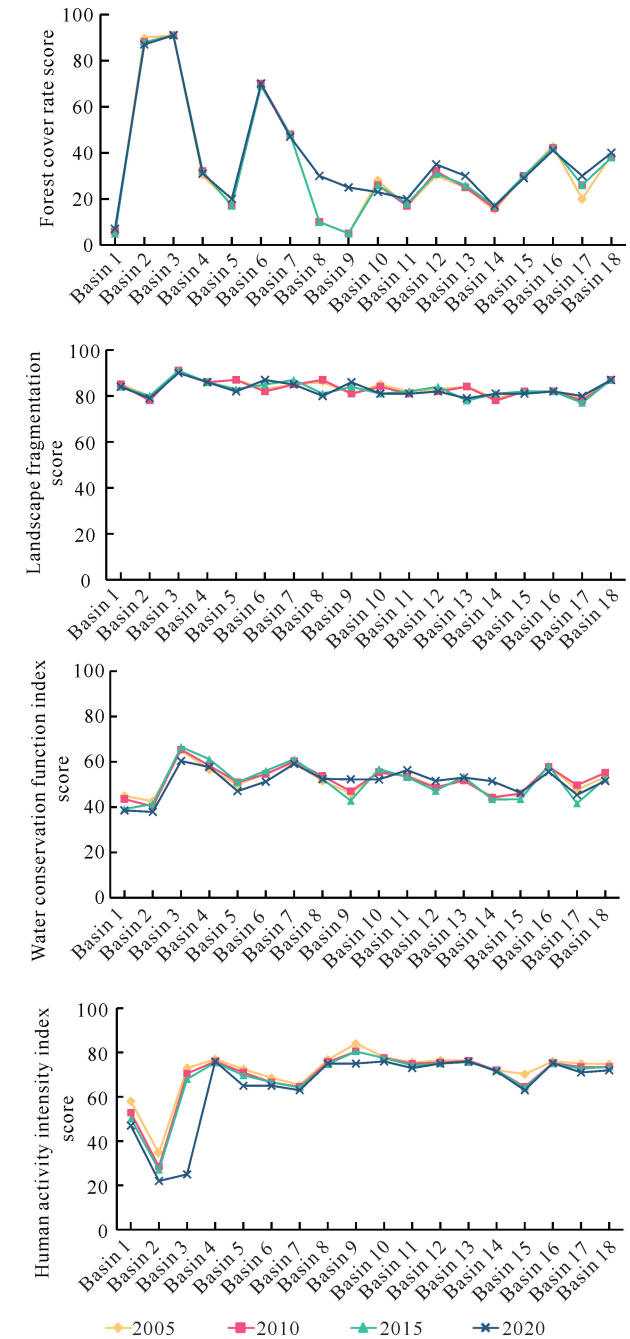


图 5 永定河流域陆域指标变化情况

Fig. 5 Index changes of land area in Yongding River Basin

人类对土地无节制的开垦、对水资源的浪费以及众多不合理的工程建设,是导致大部分子流域森林覆盖率较低、景观破碎化以及水循环能力较弱的原因。

2.2.2 水域健康状况

在水域方面,年径流量和水资源开发利用强度得分均偏低,除了流域5与流域18有比较明显的优势外,2005-2015年各子流域得分基本在50以下(图6)。由于气候波动、土地利用剧烈变化以及经济发展等影响,流域内水资源量消耗巨大;过量开发水资源造成河流径流量急剧减少、地下水位明显下降、水域面积缩小、部分地区出现用水量大于水资源总量甚至是河道断流等现象^[16,17]。虽2020年永定河流域的水域健康状况有一定改善,但总体水平还是较低,仍需继续改善。

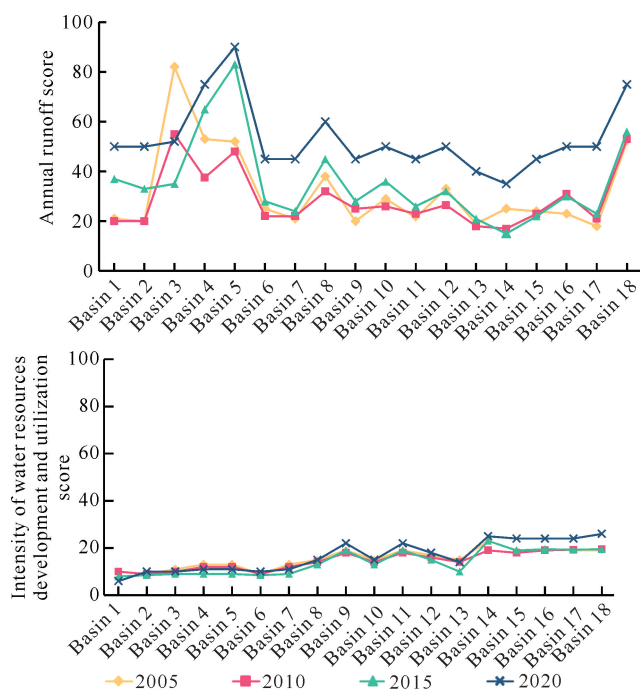


图6 永定河流域水域指标变化情况

Fig. 6 Index changes of water area in Yongding River Basin

2.2.3 流域经济状况

在经济社会方面,人均GDP得分偏低,工业产值模数和农业占GDP比重得分差异较大,大部分流域各项指标均得分较低,并且人均GDP和工业产值模数基本呈现得分连续下降的趋势(图7)。经济发展的不平衡、农业产值比重过大,以及工业快速发展过程中对水资源的过度开发利用、废水的无节制排放等行为都会造成水资源的过度损耗以及水质恶化等问题^[16]。

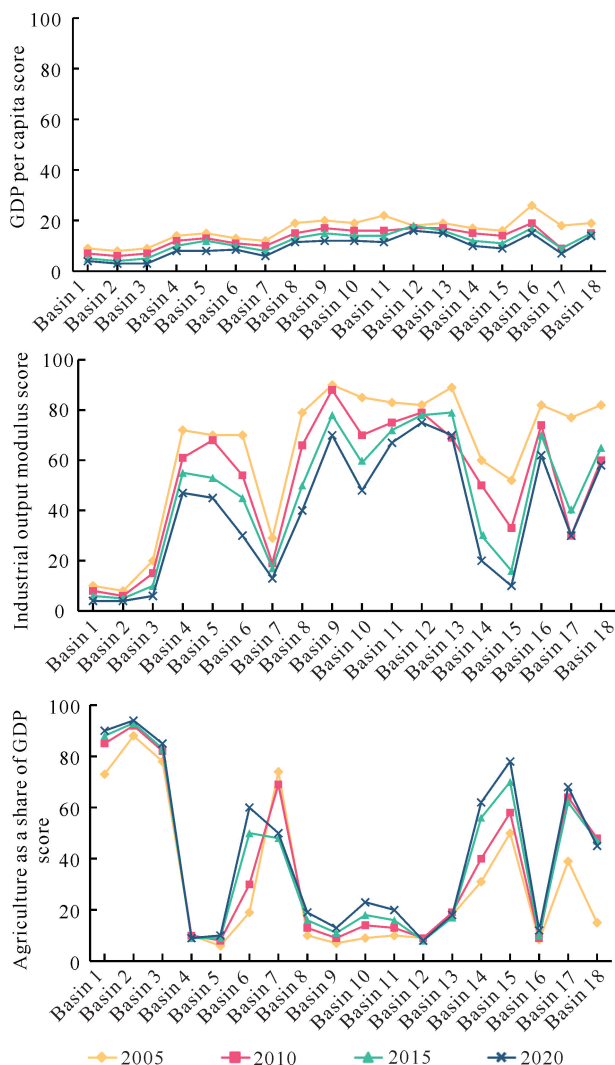


图7 永定河流域经济社会指标变化情况

Fig. 7 Index changes of economic and social in Yongding River Basin

3 讨论

根据永定河流域的健康状况等级,本研究从准则层的3个评价指标以及其对应的各目标层的影响指标,分析永定河流域健康状况的变化情况。

3.1 永定河流域陆域健康状况分析

贾文娟等^[18]对永定河流域森林植被覆盖的研究表明,引起植被覆盖度变化的主要原因是人为因素,主要包括人类活动的破坏和保护不力等导致的土地利用类型变化;次要原因是气候因素,主要是降水和温度的变化对植被产生影响,从而造成水土流失、土壤肥力受损等问题,导致原有的生态平衡受到一定程度的破坏,生态自我修复能力受损^[19,20]。

近30年来,由于永定河的多次改道和河水泛滥,

永定河下游河道出现了大面积的沙丘和荒地,导致自然湿地和林地的土地质量受损且面积逐渐减少^[21]。另外,永定河流域植被类型较为单一,植被主要为自然生长的杂草,植被覆盖度低,部分地区仍然存在大面积的裸露土地。另外,永定河流域常年缺水也会导致植被无法正常生长^[22]。人类活动在土地沙化、地下水位下降、植被单一且适应能力弱等多个方面对流域的植被覆盖度产生影响。

3.2 永定河流域水域状况分析

通过年径流量指标的数据(图6)可以看出,部分水库和河道站点存在常年断流或是流量极低的现象。影响流域内径流量的主要因素有气候变化和人类活动。气候通过气温、降水、蒸发等因素的改变影响陆地水文循环系统;人类活动则是通过土地利用、水利工程等方式改变流域环境^[23]。在20世纪六七十年代,气候是径流量变化的主要影响因素,而到了20世纪80年代之后,频繁的人类活动成为影响径流量变化的主要因素^[24,25]。近年来,永定河流域内的气温出现了明显的上升趋势,且与全球气温升高的趋势相近,但其蒸发量与降水量没有明显变化,可见影响永定河流域流量减少的主要原因并不是气候因素,而是人为因素^[9]。在一些子流域的河岸带范围内,土地大多被用作农田或人工建筑,导致部分河段挖沙严重;一些河道渠道化严重,水深较浅且流速较小;部分河道水体污染严重,使得附近的栖息地受到破坏;在洋河流域和桑干河流域内,闸坝分布较多,对河流的连通性产生了明显的阻隔作用^[26]。人类利用水利工程对河流进行拦蓄使用、对地下水进行抽取利用,这些行为都使得永定河流域内河流径流量大幅度减少,同时导致流域健康状况恶化^[27]。近年来,人们逐渐意识到问题的严重性,开始尝试采取一些措施来改善此类情况,如增加绿化面积、植林种草;调整流域内的农业结构,节约用水并大力发展节水农业;培育推广耐旱植物,减少灌溉用水量;等等。这些方法对永定河流域的径流量情况均有一定程度的改善,但由于流域内的水量问题由来已久,无法在短期内达到良好的效果,所以仍需更多的研究以及措施来解决^[28,29]。

从水资源开发利用强度指标(图6)可以看出,永定河流域内大部分地区水资源被过度开发利用。随着经济快速发展和人口急速增长,水资源的供需矛盾越来越突出,较少的水资源承载着庞大的人口需求,这就导致了水量的严重不足,以致于人们不得不对水资源进行大量的开发以满足生活所需。地下水也是

水资源开发利用中的重要一步,但由于对地下水的开采缺乏有效的统一规划和管理,流域内出现多个地下水降落漏斗区。另外,由于含水层的失水,土层受到压力形成地面沉降,土地甚至出现裂缝^[30]。根据《永定河综合治理与生态修复方案》,永定河流域水资源开发利用已接近极限,甚至超采,急需通过调整产业结构、减少单位GDP用水量、降低水资源利用强度等措施来保护水资源和改善生态环境^[26]。在这种情况下,可以通过统一调度水资源量、对水资源进行合理的配置、解决用水供需矛盾等措施来实现流域间的协同管理,从而改善水资源总量稀缺的问题^[31,32]。

3.3 永定河流域经济社会状况分析

经济社会对流域的影响有着不可忽视的作用。在经济发展过程中,流域水质恶化和水量匮乏的问题尤为突出。一方面,自20世纪70年代以来,随着永定河流域经济的快速发展,大量的工业废水、未经处理的生活污水被直接排入河道,施肥施药后的农业用水也大量渗流进入河道,导致流域内的地表河水、水库水以及地下水水质逐年恶化,并多次出现较为严重的水污染灾害,急需采取水污染防治措施来改善水质^[27]。另一方面,在生产生活中水资源的大量浪费也会导致水资源量严重匮乏:工业发展中,企业长期以来在用水时没有规划、缺乏考核、复用水率低,这些都会造成工业用水的浪费;农业生产中,大部分农业灌溉存在防渗率低、技术落后、田面不整等问题,再加上农民节水意识薄弱、管理不善、单位面积用水量严重超标等现象导致农业灌溉用水的严重浪费^[30]。

3.4 建议

综上所述,永定河流域健康状况等级整体上处于一般水平。植被覆盖率低、径流量小、水资源开发利用强度大以及经济发展的不均衡性都是永定河流域目前所面临的主要问题。为进一步改善永定河流域健康状况,本研究提出以下建议:

(1)将永定河流域内造林与水利事业结合,因地制宜发展植树工程,从而改善永定河流域内植被覆盖度低、河道连通性差等问题;

(2)加强对水资源的保护,逐步减小水资源开发强度。通过调整产业结构,开展节约用水,降低单位GDP水消耗,缓解并遏制因过量开发水资源而引发的一系列环境问题,恢复河流的自然属性;

(3)进一步完善永定河流域的水资源管理,优化产业结构、整治河道,改善因经济快速发展而导致大量生态用水被占用的情况;

(4)建立以流域健康为基础的综合管理目标。基于永定河流域的特征,建立完整的健康评价指标,并指定包括流域植被、生态流量、水质、污染负荷、底栖动物完整性等多目标综合考核体系^[32],服务于流域健康评价,指导流域健康管理。

4 结论

本研究在综合分析国内外关于流域健康评价方法和研究进展的基础上,结合本流域的特点,构建了永定河流域健康评价体系,并对其健康状况进行评估。结果表明,永定河流域健康状况等级总体处于一般的水平,且在2005-2020年无明显变化,个别子流域在前期有小幅度的下降,但在后期环境治理等措施的实施下,部分流域的健康状况得到了改善。其中,水域和经济社会得分偏低,反映出人类对水资源的过度开发和浪费导致河流径流量下降,以及经济发展过程中对环境的忽视等问题。另外,陆域中森林覆盖率得分偏低且差异较大,反映了永定河流域内整体植被覆盖度低、绿化程度低等现象,进而导致生态结构不稳定、生态环境脆弱等问题。

参考文献

- [1] WANG L, WANG Z J, KOIKE T, et al. The assessment of surface water resources for the semi-arid Yongding River Basin from 1956 to 2000 and the impact of land use change [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(9): 1123-1132.
- [2] 崔辰根. 额济纳河流域生态健康评价研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- [3] MEYER J L. Stream health: Incorporating the human dimension to advance stream ecology [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1997, 16(2): 439-447.
- [4] MOSAFFAIE J, JAM A S, TABATABAEI M R, et al. Trend assessment of the watershed health based on DP-SIR framework [J]. *Land Use Policy*, 2021, 100: 104911. DOI:10.1016/j.landusepol.2020.104911.
- [5] 张金艳. 大通河流域河流水文健康评价及生态流量研究[D]. 西安:西北大学, 2021.
- [6] 蒋衡, 刘蓬, 刘琳, 等. 基于PSR模型的磁湖流域生态系统健康评价[J]. *湖北大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(6): 661-666.
- [7] 侯蕾. 北方水资源短缺流域生态-水文响应机制研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019.
- [8] 崔文彦, 刘得银, 梁舒汀, 等. 永定河流域水生态环境质量综合评价[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(2): 23-28.
- [9] 彭毅, 贾仰文, 牛存稳, 等. 永定河三家店以上流域径流减少归因分析[J]. *水利水电工程学报*, 2022(1): 67-76.
- [10] 孟翠婷. 永定河京津冀段水生态环境特征分析及水生态环境健康评价[D]. 沈阳:沈阳大学, 2021.
- [11] 燕琳. 河流自然性评价指标体系与评价方法研究[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- [12] 武海霞, 李清雪, 孙玉壮, 等. 子流域划分在时间尺度上对年径流、泥沙及营养物的影响——以漳河上游流域为例[J]. *中国农村水利水电*, 2017(12): 131-135, 144.
- [13] 张建云. 永定河绿色生态发展长效机制思考与建议[J]. *中国水利*, 2021(1): 10-11.
- [14] 王爽. 辽阳市水资源紧缺程度的模糊综合评价[J]. *黑龙江水利科技*, 2019, 47(6): 218-221.
- [15] 方云祥. 安徽省典型流域生态系统健康评价及管理对策研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.
- [16] 冯兆忠, 刘硕, 李品. 永定河流域生态环境研究进展及修复对策[J]. *中国科学院大学学报*, 2019, 36(4): 510-520.
- [17] 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(9): 4202-4210.
- [18] 贾文娟, 韦雪花, 王秀兰, 等. 北京永定河流域森林植被覆盖研究[J]. *林业调查规划*, 2011, 36(4): 21-24.
- [19] 张连伟. 永定河变迁的历史回顾与反思[J]. *华北水利水电大学学报(社会科学版)*, 2021, 37(1): 42-47, 114.
- [20] XIA J, QIU B, LI Y Y. Water resources vulnerability and adaptive management in the Huang, Huai and Hai river basins of China [J]. *Water International*, 2012, 37(5): 523-536.
- [21] 赵雅莉, 宫兆宁. 永定河下游土地覆盖变化及其驱动力分析[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(5): 63-71.
- [22] 刘硕, 李品, 尚博, 等. 永定河流域典型沙区生态状况及修复建议[J]. *环境生态学*, 2021, 3(8): 51-58.
- [23] 张利平, 于松延, 段尧彬, 等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(6): 391-397.
- [24] 侯蕾, 彭文启, 董飞, 等. 永定河上游流域水文气象要素的历史演变特征[J]. *中国农村水利水电*, 2020(12): 1-8, 14.
- [25] NIU K J, HU Q F, WANG Y T, et al. Analysis on the variation of hydro-meteorological variables in the yongding river mountain area driven by multiple factors [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3199. DOI: 10.3390/RS13163199.
- [26] 解莹, 张海萍, 彭文启, 等. 永定河上游河流健康评价[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(S1): 319-324.

- [27] LUO Z R, ZHAO S Q, WU J, et al. The influence of ecological restoration projects on groundwater in Yongding River Basin in Beijing, China [J]. *Water Supply*, 2019, 19(8): 2391-2399.
- [28] 王艺璇, 沈彦军, 高雅, 等. 永定河上游环境变化和水资源演变研究进展[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 656-668.
- [29] 胡庆芳, 王磊之, 万超, 等. 永定河水生态修复与生态水量精细化调度[J]. *中国水利*, 2021(1): 62-64.
- [30] 王青杵. 山西永定河流域植被建设对土壤侵蚀的影响及生态需水研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2013.
- [31] 任涵璐, 崔秀平, 王白陆, 等. 基于优化配置的永定河水量分析及生态修复关键环节探讨[C]// 2021(第九届)中国水生态大会. 第九届中国水生态大会论文集. 西安: [出版者不详], 2021: 473-480. DOI: 10. 26914/c.cnkihy. 2021. 024720.
- [32] 王立明, 阎战友. 永定河水量调度实施进展与展望[J]. *中国水利*, 2021(1): 27-30.

Health Assessment and Change Analysis of Yongding River Basin

LIU Ziyu¹, REN Liangsu^{1,2}, BAI Yijuan¹, ZHAO Yinjun², DING Aizhong¹, LI Hongbing³

(1. Institute of Water Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Planning, Nanjing Normal University, Nanning, Guangxi, 530100, China; 3. Control Bureau of Water Resources, Kunming, Yunnan, 652100, China)

Abstract: The rapid development of human society has led to increasingly serious problems such as water resources shortage and water environment pollution in the basin. As an important part of Haihe River basin, the Yongding River Basin spans Inner Mongolia, Shanxi, Hebei, Beijing, and Tianjin, and its healthy development has an important impact on the region and deserves further study. Based on the comprehensive analysis of watershed health evaluation methods at home and abroad, this study constructs the health evaluation index system of the Yongding River Basin, and evaluates the health status of 18 sub-basins of the Yongding River Basin from 2005 to 2020 by using comprehensive index evaluation method and analytic hierarchy process. The experimental results show that there is no obvious change in the overall health status of the Yongding River Basin from 2005 to 2020, and the health status of individual sub-basins has deteriorated slightly in the early stage, but the overall health status has improved in 2020. By analyzing the reasons for the changes in the health of the watershed, it is considered that the lack of water resources, the unreasonable development of the economy and the severe interference of human activities are the main reasons for the general and local deterioration of the health status of the Yongding River Basin. Based on this, the countermeasures and suggestions for the health management of the Yongding River Basin are given to provide reference for the rational development, utilization and protection of the Yongding River Basin.

Key words: the Yongding River; analytic hierarchy process; watershed health; ecosystem; human activities