

DOI: 10.5846/stxb201811182499

刘琦, 田雨露, 刘洋, 许丁雪, 李洁敏, 江源. 两类水质综合评价方法的特点及其在河流水环境管理中的作用. 生态学报, 2019, 39(20): - .

Liu Q, Tian Y L, Liu Y, Xu D X, Li J M, Jiang Y. Characteristics of Two Comprehensive Assessment Methods for Water Quality Based on Different Evaluation Criteria and their Applications in Aquatic Environment Management. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

两类水质综合评价方法的特点及其在河流水环境管理中的作用

刘琦^{1,2}, 田雨露², 刘洋², 许丁雪², 李洁敏², 江源^{1,2,*}

1 中药资源保护与利用北京市重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875

摘要:河流水质恶化已成为严峻的环境问题, 针对河流开展水质综合评价对河流水环境管理具有重要意义。依据不同的评价目标, 选择合理的综合评价的评估标准成为河流水质评价中重要的问题之一。本研究通过基于期望值和阈值的水质健康综合评价法 (ETI) 和水质质量指数 (WQI) 两种水质综合评价方法对“引滦入津”工程重要水源地伊逊河水质进行评价, 结果显示: 1) 伊逊河水质 ETI 评估结果为良好等级, WQI 评估结果为一般等级; 2) 伊逊河采样点水质在 ETI 评价中分布于 4 个等级, WQI 仅分布于 2 个等级; 3) 伊逊河自上游至下游水质显著降低, 特别是 ETI 评估中由优秀等级转变为差等级; 4) ETI 和 WQI 评估结果显示极显著相关性 ($R=0.951, P<0.01$); 5) 通过逐步多元回归, ETI 评估结果的主导因子是 DO、EC、SS、BOD₅ 和 TP ($P<0.05$), WQI 评估结果的主导因子是 DO、SS、BOD₅、TP、TN 和 NH₃-N ($P<0.05$)。进一步分析表明伊逊河水质恶化与其流域内土地利用情况密切相关。在河流水环境管理中, ETI 作为一种水质相对值评估方法, 能更好体现流域内水质差异的区分度, 便于管理者迅速定位流域内亟需治理的河流或河段, 同时能够根据河流自身特征制定管理目标, 可作为河流管理绩效评估的有效手段; 而 WQI 作为一种水质绝对值评估方法, 更适用于河流水质时间变化评估, 对河流经长期治理后的管理效果评价起到重要作用。

关键词:河流水质特征; 水质综合评价; 管理应用; 伊逊河

Characteristics of Two Comprehensive Assessment Methods for Water Quality Based on Different Evaluation Criteria and their Applications in Aquatic Environment Management

LIU Qi^{1,2}, TIAN Yulu², LIU Yang², XU Dingxue², LI Jiemin², JIANG Yuan^{1,2,*}

1 Beijing Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Protection and Utilization, Beijing 100875, China

2 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Water quality deterioration in rivers has become a serious environmental problem. It is of great significance for management to carry out comprehensive assessments of water quality. Due to different objectives, it is crucial to select reasonable evaluation criteria for a comprehensive assessment. In this study, we assessed the water quality conditions by the Water Health Assessment Index, based on the expectation and threshold value (ETI) and water quality index (WQI) in Yixun River, which is the water source for the “Water Diversion Project from Luanhe River to Tianjin City”. The results showed that 1) the water quality rated at a “good” level for ETI, and “moderate” level for WQI; 2) the water quality in 24 sites was classed into four levels for ETI and only two levels for WQI; 3) the water quality decreased significantly from upstream to downstream in Yixun River. Especially for ETI, the water quality changed from “excellent” to “poor”. 5) The

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07301-001-03)

收稿日期: 2018-11-18; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangy@bnu.edu.cn

two indices, ETI and WQI, showed a significant correlation ($R = 0.951$, $P < 0.01$). From the results of the stepwise multiple regression, the dominant factors for ETI were DO, EC, SS, BOD_5 , and TP ($P < 0.05$); and those for WQI were DO, SS, BOD_5 , TP, TN, and NH_3-N ($P < 0.05$). These results suggested that 1) the water quality deterioration in Yixun River was closely related to the land use. 2) For aquatic environment management, ETI, as an assessment based on the relative state of water quality, could reflect spatial variation in river water quality better than WQI, which was more suitable for water quality management in a basin. Therefore, ETI can help managers to make and set management objectives for polluted rivers or streams based on the water quality, and can be used as an effective method to evaluate river management performance. Meanwhile, WQI, as a method for evaluating the absolute state of water quality, is more suitable for evaluating the temporal variation in river water quality, and plays an important role in evaluating the effect of aquatic environment management.

Key Words: River water quality characteristics; comprehensive assessment methods for water quality; Management application; Yixun River

河流是淡水资源的重要来源,对人类和生物健康起着至关重要的作用^[1-2]。随着经济的快速增长,大量的工、农业废水和生活污水随排放及降雨径流进入河流水体中,致使河流水质急剧恶化^[3-4]。为保护河流水资源,保障河流水质安全,选择快速有效的水质评价方法能够协助管理部门了解河流水环境质量,确定河流污染的关键区,从而有针对性地进行治理。

水质评价是通过河流理化、营养盐和生物等指标按一定的评价标准,对实测数据进行计算,进而对河流水质进行定性或定量的评估^[5]。目前,水质综合评价方法被广泛应用^[6-9],相比于国家环境保护总局颁布的《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的单因子评价方法,这类方法能够反映河流水质的整体状况,避免由于单因子评估造成水质评估结果的片面性;同时,评估结果简单易懂,有利于管理者在水环境管理中应用^[10]。大量研究已经使用综合评价方法对河流水质进行评价^[7,11-13]。Cheng 等^[12]使用基于期望值和阈值的水质健康综合评估法(ETI)对海河流域水质进行综合评价,该评价方法是根据河流自身特点选择参考条件(理想条件/水质污染的临界条件)下的水质作为评估标准^[7];Sun 等^[13]使用水质质量指数(WQI)对东江流域中游河流水质进行了评价,该方法是依据前人研究结果或指标对水健康的危害程度确定的固定指标评估标准^[6,13]。由于指标评估标准的不同,评估结果也不尽相同,这使得综合评价方法在河流水质管理中的应用受到限制。因此,依据评价目标的不同,如何合理选择综合评价的评估标准成为至关重要的问题。

以往在一个流域对多种综合评价方法的对比研究,多侧重于选择出更适用于该条河流的评价方法^[5,8,11]。本研究旨在对当前两类河流水质评估方法及评估标准进行分析对比,以期明确不同评估标准的水质综合评估方法在河流管理中的作用。研究以“引滦入津”工程的重要水源伊逊河为例^[14-15],通过使用 ETI 和 WQI 两种不同评估标准的综合评价方法对该河流 24 个样点的水质进行评价,分析伊逊河水质评估结果的特征和空间差异,剖析两类水质评价标准的评价结果的适用性,探索不同水质评价方法在河流水环境管理中的作用,为我国水环境管理时评估标准的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

伊逊河,是滦河中流域面积最大的支流,发源于河北省围场县哈里哈乡,流经隆化县和承德市双滦区,于滦河镇汇入滦河干流(图 1)。伊逊河流域属于温带季风气候,多年平均温度 5.6°C , 年内 7 月气温最高,平均为 21.2°C 。年平均降水量 452.8 mm , 66% 的降水和径流出现在夏季(<http://data.cma.cn/>)。流域内林地面积百分比为 76.39%, 为主要土地利用类型,遍布全流域;草地面积占比仅 1.43%, 主要位于流域上游;农业用地面积占比为 19.21%, 主要沿河流两岸分布,特别是流域中下游地区;城镇用地面积占比为 2.64%, 但分布较为

集中,主要位于上游围场县和下游隆化县和承德市双滦区^[16]。流域土地利用的分布形成了一定的变化梯度:由上游的林地草地,向中下游地区的农业用地、建设用地逐步过渡。由于受不同程度人类活动的影响,流域内河流水质存在一定的空间差异,这有利于体现两类评估标准的评价结果的特点及其差异性。同时,流域土地利用由自然本底状态向人类活动强烈的状态变化,也有利于 ETI 评价中确定河流水质最优(期望值)和最差(阈值)标准。

1.2 样品采集

依据分层采样原则,样点覆盖伊逊河流域各类土地利用类型以及主要支流;同时,样点设置还尽可能考虑空间分布的均匀性、交通可达性等因素。综上,在伊逊河流域共布设采样点 24 个,于 2017 年 7—8 月对伊逊河进行水样采集。水样采集参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[17]进行,使用 1L 有机玻璃采水器,在采样点所在位置河心或距离河岸 5m 处采集河流表层水体(水深约 0.5m)。每个采样点采集 3 次水样并充分混合,将混合后的水样分为 2 份,一份为不做任何处理的原始水样;另一份水样经孔径为 0.45 μm 的 Whatman GF/C 玻璃纤维素膜过滤。两份水样均加入少量浓硫酸(H_2SO_4),进行酸化保存。滤膜避光低温保存,用于测定叶绿素 a(Chla)和悬浮性固体(SS)。水样瓶事先用 1:10 盐酸溶液浸泡 24h,用蒸馏水洗净并烘干;玻璃纤维素膜预先经 450℃ 高温灼烧处理 6h。全部样品均低温冷冻储存,并在尽可能短的时间内运回实验室进行室内分析。

1.3 水质指标测定

10 个指标分为现场测定和实验分析两部分。1)现场测定:溶解氧(DO),电导率(EC)在采样现场分别使用便携式溶解氧仪(YSI DO200,YSI 股份有限公司,美国)和电导率仪(METTLER-SG DUO,梅特勒-托利多集团,美国)对样品进行瞬时测定。2)实验分析:高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)和总磷(TP)使用原始水样测定。 COD_{Mn} 采用高锰酸盐滴定法;TN 采用紫外分光消解法;TP 采用钼锑抗分光光度法。氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)使用过滤水样测定。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂比色法; $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用紫外分光光度法。悬浮性固体(SS)和叶绿素 a(Chla)通过过滤膜上的残余物进行测定。SS 采用称重法测定;Chla 采用丙酮分光光度法进行测定^[17]。 BOD_5 采用改进后的接种法测定^[18]。

1.4 ETI 和 WQI 评价方法

1.4.1 ETI 评估法

基于期望值和阈值的水质健康综合评估法(ETI)是一种基于被评价河流本身水质特征设置评估的期望值和阈值的评价方法^[7],是一种基于河流水质相对情况的评估,其中期望值是指在参考条件(理想条件或自然条件)下的水质状况。阈值是指被评价河流水质处于严重危害生态系统健康的临界值。ETI 评估值通过河流理化指标、营养盐指标和生物指标等标准化值计算所得,公式如下^[7,13]:

$$\text{ETI} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}$$

式中,ETI 为水质健康综合评估值, C_i 为理化指标组、营养盐指标组和各类生物指标组的标准化值, n 为指标组

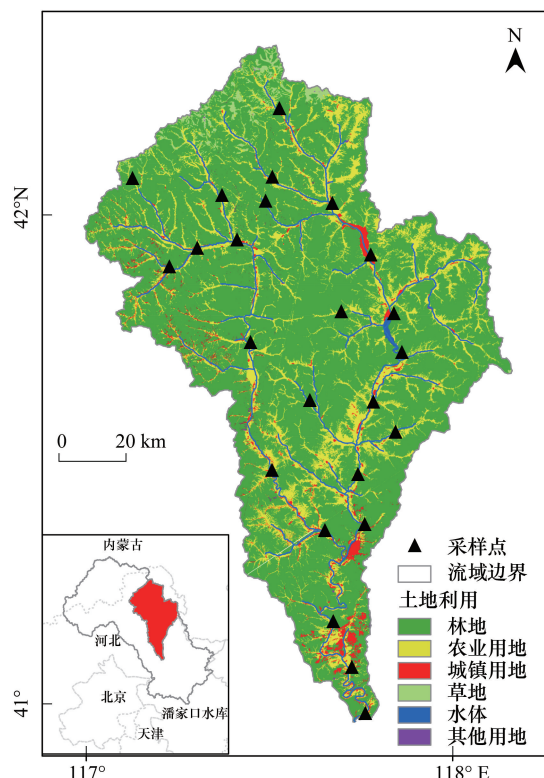


图 1 伊逊河流域采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Yixun River basin

的数量。*ETI* 评估值范围为 0—1, 评估值越高说明水质健康程度越高。评估结果被分为 5 个等级: 优秀 (0.80—1], 良好 (0.60—0.80], 一般 (0.40—0.60], 差 (0.20—0.40], 极差 (0—0.20]。各指标组指标标准化值计算如表 1 所示。

表 1 ETI 方法各水质指标标准化计算
Table 1 Standardized calculation of water quality parameters for ETI method

指标组 Index group	水质指标 Water quality indexes	指标标准化 Standardization of indexes	指标组评估值计算 Calculation for evaluation values of index group
理化指标 Physicochemical indexes	DO ^a	标准化值 = $\frac{\text{实测值} - \text{期望值}}{\text{阈值} - \text{期望值}}$	$S_p = \frac{\sum_{i=1}^n C_{si}}{n}$
	EC ^b		
	SS ^b	标准化值 = $\frac{\text{阈值} - \text{实测值}}{\text{阈值} - \text{期望值}}$	其中 S_p 为理化指标组的评估值, C_{si} 为理化指标 i 的标准化值, n 为理化指标的数量。
	COD _{Mn} ^a		
	BOD ₅ ^a		
营养盐指标 Nutrient indexes	TP ^a	标准化值 = $\frac{\text{阈值} - \text{实测值}}{\text{阈值} - \text{期望值}}$	$S_n = \frac{\sum_{i=1}^n C_{si}}{n}$
	TN ^a		若 $C_{sNH_3-N} = 0$, 则 $S_n = 0$
	NH ₃ -N ^a		其中 S_n 为营养盐指标组的评估值, C_{si} 为营养盐指标 i 的标准化值, n 为营养盐指标的数量, C_{sNH_3-N}
	NO ₃ -N ^b		为 NH ₃ -N 的标准化值
生物指标 Biological indexes	Chla ^b	标准化值 = $\frac{\text{阈值} - \text{实测值}}{\text{阈值} - \text{期望值}}$	$S_b = \frac{\sum_{i=1}^n C_{si}}{n}$ 其中 S_b 为生物指标组的评估值, C_{si} 为生物指标 i 的标准化值, n 为生物指标的数量

a 表示该指标期望值和阈值的确定分别依据地表水质标准 (GB3838—2002) I 类水和 IV 类水质标准; b 表示该指标期望值和阈值的确定分别为评价河流全部采样点实际测定含量的 5% 和 95% 分位数

1.4.2 WQI 评估法

水质质量指数 (WQI) 综合评估法是一种评估标准较为固定的评价方法, 其各指标的分值以及指标权重依据大量前人研究或各参与评估指标对水健康的危害程度来确定^[19-20], 是一种基于河流水质真实情况的评估。其计算公式如下:

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i * P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

式中: WQI 为水质综合指数 (表 2), C_i 是水质因子 i 的标准化得分; P_i 是水质因子 i 的权重, P_i 的最小值是 1, 最大值为 4 (表 2); WQI 评估值范围为 0—100, 其值越高, 代表水质健康程度越高。根据得分河流水质被分为 5 个等级: 优秀 [90—100]、良好 [70—90)、一般 [50—70)、差 [25—50)、极差 [0—25)。

1.5 分析方法

研究通过 Kolmogorov-Smirnov 检验验证数据是否符合正态分布, 对不符合正态分布的数据组进行 $\ln(x+1)$ 变换^[22]; 使用 Spearman 相关分析判断 ETI 和 WQI 评估结果的相关性; 使用主成份分析 (PCA) 识别引起伊逊河水质空间差异的主要指标; 使用逐步多元回归识别引起 ETI 和 WQI 评估结果差异的主导指标。研究区样点图和 ETI、WQI 评估结果的空间分布图在 ArcGIS 10.0 软件下完成; Spearman 相关分析、PCA、逐步多元回归在 SPSS 20 软件下完成; 其他作图使用 Origin 9.0 完成。

2 结果

2.1 伊逊河各水质指标特征

伊逊河各水质指标显示 (表 3): 河流理化指标中, 溶解氧 (DO) 平均为 5.99mg/L, 达到 III 类水质; 电导率

(EC)平均为 435.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$;悬浮性固体(SS)平均为 10.83mg/L;高锰酸盐指数(COD_{Mn})平均为 6.70mg/L,达到Ⅳ类水质;五日生化需氧量(BOD_5)平均为 4.06mg/L,达到Ⅳ类水质。河流营养盐指标中,总磷(TP)平均为 0.13mg/L,达到Ⅲ类水;TN 平均为 1.84mg/L,达到Ⅴ类水质;氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)平均为 0.23mg/L,达到Ⅱ类水质;硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)平均为 2.67mg/L。生物指标叶绿素 a(Chla)平均为 7.52 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

表 2 WQI 方法各水质因子分数及权重
Table 2 Assignment and weight of water quality parameters for WQI method

因子 Factors	权重 Weight	标准化分数 Standardization values										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
溶解氧 Dissolved Oxygen	4	≥ 7.5	>7	>6.5	>6	>5	>4	>3.5	>3	>2	≥ 1	<1
电导率 Electrical conductivity	2	<750	<1000	<1250	<1500	<2000	<2500	<3000	<5000	<8000	≤ 12000	>12000
悬浮性固体 Suspended Solid	3	<10	<15	<20	<30	<50	<75	<100	<150	<200	≤ 300	>300
高锰酸盐指数 Permanganate Index	3	<1	<2	<3	<4	<6	<8	<10	<12	<14	≤ 15	>15
五日生化需氧量 Biochemical oxygen demand after five days	3	<0.5	<2	<3	<4	<5	<6	<8	<10	<12	≤ 15	>15
总磷 Total Phosphorus	1	<0.01	<0.02	<0.05	<0.1	<0.15	<0.2	<0.25	<0.3	<0.35	≤ 0.4	>0.4
总氮 Total Nitrogen	3	<0.1	<0.2	<0.35	<0.5	<0.75	<1	<1.25	<1.5	<1.75	≤ 2	>2
氨氮 Ammonia Nitrogen	3	<0.01	<0.05	<0.1	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5	<0.75	<1	≤ 1.25	>1.25
硝酸盐氮 Nitrate Nitrogen	2	<0.5	<1	<1.5	<2	<3	<4	<5	<6	<8	≤ 10	>10
叶绿素 a Chlorophyll a	3	<1	<4	<7	<10	<15	<20	<30	<40	<50	≤ 65	>65

指标得分和权重依据前人研究结果或对生活健康的危害程度确定^[20-21]

表 3 伊逊河各水质指标特征
Table 3 Characteristics of water quality parameter in Yixun River

指标 Indexes	平均值±标准差 Mean±SD	期望值 Expectation	阈值 Threshold
溶解氧 Dissolved Oxygen(DO,mg/L) ¹	5.99±1.13	7.5	3
电导率 Electrical conductivity(EC, $\mu\text{s}/\text{cm}$) ²	435.6±144.7	194.88	607.3
悬浮性固体 Suspended Solid(SS, mg/L) ²	10.83±11.12	2.12	7.02
高锰酸盐指数 Permanganate Index(COD_{Mn} , mg/L) ¹	6.70±1.29	2	10
5 日生化需氧量 Biochemical Oxygen Demand After Five Days(BOD_5 , mg/L) ¹	4.06±1.95	3	6
总磷 Total Phosphorus(TP, mg/L) ¹	0.13±0.17	0.02	0.3
总氮 Total Nitrogen(TN, mg/L) ¹	1.84±1.35	0.2	1.5
氨氮 Ammonia Nitrogen($\text{NH}_3\text{-N}$, mg/L) ¹	0.23±0.11	0.15	1.5
硝酸盐氮 Nitrate Nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$, mg/L) ²	2.67±1.60	0.24	4.93
叶绿素 a Chlorophyll a(Chla, $\mu\text{g}/\text{L}$) ²	7.52±3.90	1.90	13.98

1 表示该指标期望值和阈值的确定分别依据地表水质标准(GB3838—2002)Ⅰ类水和Ⅳ类水质标准;2 表示该指标期望值和阈值的确定分别为评价河流全部采样点实际测定含量的 5%和 95%分位数

2.2 伊逊河水质综合评估结果

水质综合评估结果显示,伊逊河 ETI 评估得分平均为 0.61,达到良好水平,河流水质在源头区为优秀等级,在汇入滦河干流时变化为差等级,水质有明显下降趋势(图 2a)。在 24 个水质评价样点中,水质等级为优秀的样点占全部样点的 12.50%;良好等级的样点最多,占 41.67%;一般和差的样点分别占 29.17%和 16.67%;未出现极差等级的样点。

伊逊河 WQI 评估得分为 66.9,达到一般等级。河流水质从上游至下游也显示出逐渐降低的趋势,水质差异较 ETI 评估结果较小(图 2b)。在 24 个水质评价样点中,仅出现两个水质等级,为良好和一般等级,占比分别为 37.5%和 62.5%。

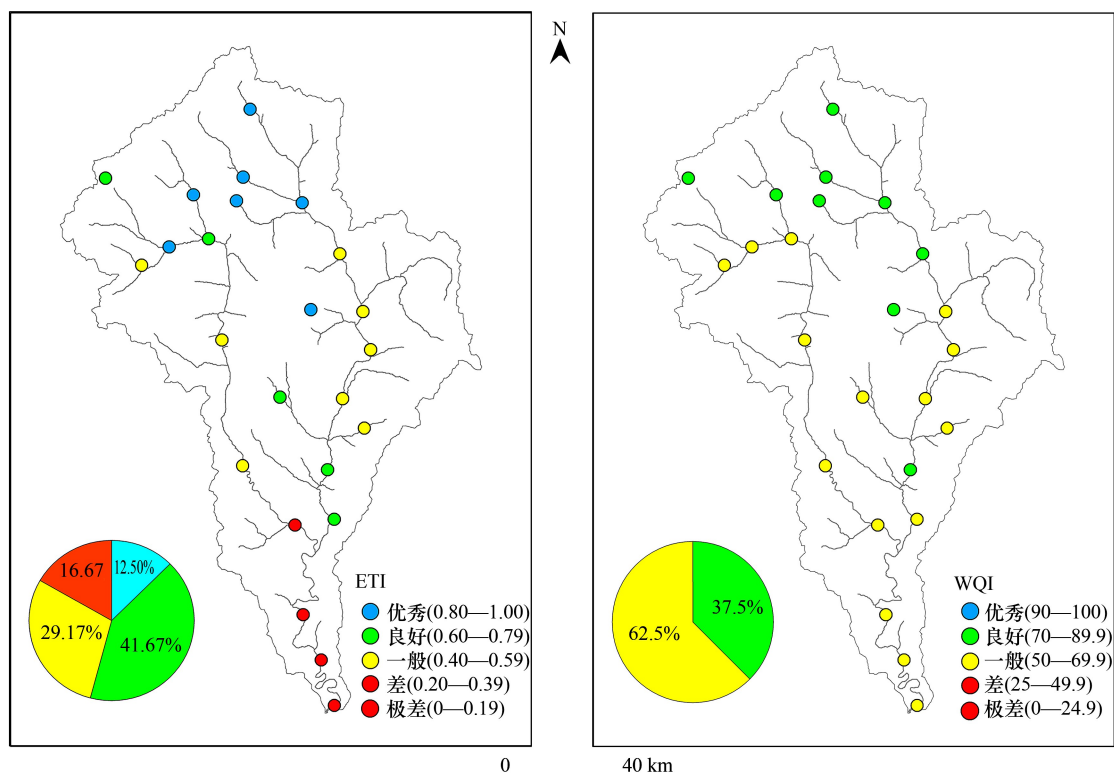


图2 ETI 和 WQI 评估等级及其空间分布图

Fig.2 Water quality levels and spatial distribution of ETI and WQI assessment

Spearman 相关分析结果显示(图3),ETI 和 WQI 两种评价方法的评估结果相关性极显著($R=0.951$, $P < 0.01$),但 ETI 评估结果的区分度较 WQI 评估结果更加显著。

2.3 综合评价主导因子

基于主成份分析方法(PCA),筛选出引起伊逊河水质差异的主要指标(表4)。依据特征值大于1的原则,保留对伊逊河水质差异解释最高的前三轴,共解释伊逊河水质差异的70.89%。各指标在主成份轴的位置依据各因子在三个主成份轴的最大值判断。其中第一轴主要为 $\text{NO}_3\text{-N}$ (0.935)、TN (0.898) 和 BOD_5 (0.803);第二轴主要为 $\text{NH}_3\text{-N}$ (0.755)、TP (0.73)、 COD_{Mn} (0.67)、EC (0.594)、SS (0.528)、Chl-a (0.467);第三轴主要为 DO (0.841)。

通过逐步回归分析筛选 ETI 和 WQI 评估结果的主导指标,结果显示(表4):影响 ETI 评估结果的主导指标为 DO、EC、SS、 BOD_5 和 TP 等五个指标($P < 0.05$);影响 WQI 评估结果的主导指标为 DO、SS、 BOD_5 、TP、TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等六个指标($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 伊逊河水质的空间差异

ETI 和 WQI 两种水质综合评价方法的结果都显示伊逊河自上游至下游水质有明显的下降趋势(图2)。

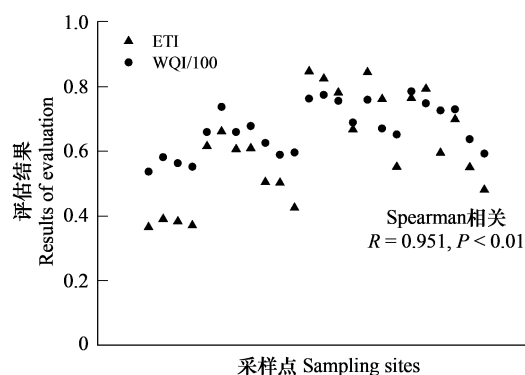


图3 ETI 和 WQI 评估结果相关性图

Fig.3 The Spearman correlation between ETI and WQI

表 4 伊逊河水质差异及评估结果主导因子

Table 4 Variation of water quality and the dominant factors for ETI and WQI in Yixun River

	主成份 1 Principal component 1	主成份 2 Principal component 2	主成份 3 Principal component 2	逐步回归结果 Results of step regression	
分轴解释率 Explained variation	33.38%	25.33%	12.19%	ETI	WQI
累积解释率 Cumulative Explained variation	33.38%	58.71%	70.89%		
溶解氧 Dissolved Oxygen	0.126	-0.3	0.841	●	●
电导率 Electrical conductivity	0.51	0.594	0.097	●	○
悬浮性固体 Suspended Solid	0.219	0.528	-0.491	●	●
高锰酸盐指数 Permanganate Index	-0.556	0.67	0.23	○	○
五日生化需氧量 Biochemical Oxygen Demand After Five Days	0.803	0.169	0.31	●	●
总磷 Total Phosphorus	0.307	0.73	-0.004	●	●
总氮 Total Nitrogen	0.898	-0.022	-0.098	○	●
氨氮 Ammonia Nitrogen	-0.346	0.755	0.151	○	●
硝酸盐氮 Nitrate Nitrogen	0.935	0.11	0.087	○	○
叶绿素 a Chlorophyll a	-0.407	0.467	0.267	○	○

●代表在逐步回归中,该因子的显著性为 $P<0.05$; ○代表在逐步回归中,该因子的显著性为 $P>0.05$

特别是在 ETI 评估中,水质在河流上游达到优秀等级,河流中游主要是良好和一般等级,河流下游水质已退化至差等级。从该河流的土地利用分布来看,河流上游主要以林地和草地为主(图 1),仅有少量的农业用地。大量研究表明林地和草地可作为河流污染物的汇,有显著的截留污染和净化水质的作用^[23-24]。自河流中游开始,沿河流两岸出现大量的农业用地,特别是在雨季,大量的化肥随地表径流进入伊逊河中。据 2017 年承德市统计年鉴显示,伊逊河化肥施用量(氮肥、磷肥、复合肥等)为滦河流域最高,分别为 3.07×10^4 t、 0.9×10^4 t 和 0.9×10^4 t。此外,该区域单位播种面积的化肥施用量也为滦河流域最高,说明在流域土壤、气候等自然条件都类似的情况下,伊逊河流域对于化肥的使用可能存在过量的情况。一方面,化肥的不合理使用造成资源的浪费,单位种植面积成本增高;另一方面,过量的化肥流入河流中也造成了河流水质的显著下降^[25-26]。河流下游流经隆化县和承德市双滦区,人类活动显著,河流两岸城镇用地剧增。据 2017 年承德市统计年鉴显示,隆化县与承德双滦区共有常住居民 55 万人,环境污染企业 50 多家,大量的城市居民的生活污水和工业废水成为污染伊逊河下游水质的重要因素^[26-29]。同时,城镇建设用地的增加,也使得河流自身的水质净化功能显著下降^[29]。

3.2 两种评价方法评估结果的比较

通过 ETI 和 WQI 两种水质综合评价方法的结果发现,伊逊河整体水质分别为良好和一般等级,尽管评估等级有所差异,但是 Spearman 相关分析的结果显示两种评价方法的评估结果具有极显著的相关性(图 3)。通过参与评估的 10 个水质参数 PCA 结果与 ETI、WQI 评估结果的逐步回归的结果相比较,发现这两种方法筛选出的主导因子在 PCA 各轴的主要因子中均有体现(表 4)。此外,河流水质综合评价结果的变化与土地利用的空间分布关系密切(图 1)。以上结果均说明这两种方法都能较好地体现伊逊河水质的空间差异。

然而,评估结果也显示,24 个样点的 ETI 的评估结果分别位于 4 个等级上,而在 WQI 评估中只出现 2 个等级(图 2)。说明 ETI 评价方法的结果波动幅度更大,在正确反映水质空间差异的情况下,能够体现出更好的区分度。尽管 WQI 在评价分值上也体现了伊逊河水质的空间差异,但其区分度、评估结果的波动幅度较 ETI 评估结果较低。这一结论与两种评价方法在东江流域河流的评估结果相类似^[7,13],江源等^[7]使用 ETI 方法发现东江流域的采样点水质分布于 5 个等级上,而 Sun 等^[13]使用 WQI 方法得到东江流域各采样点水质主要集中在优秀和良好等级。

3.3 两种水质综合评价方法在水环境管理中的作用

以往的研究大多旨在通过同一河流比较不同的水质评价方法,选择出更适用于该条河流的评价方

法^[5, 8, 11]。与以往研究不同,本研究中两类水质评价标准的结果的空间差异都与流域土地利用变化相吻合(图 1,图 2),尽管 ETI 的评估结果在水质空间差异的区分度上优于 WQI,但不代表 ETI 的方法在河流评价中优于 WQI,在水环境管理中两种方法都具有不可忽视的作用。

EQI 评价方法是一类以评价河流自身水质特征选取期望值和阈值的评价方法^[7],是一种基于河流水质相对情况的评估方法。在水质管理中,可以选择被评价流域自然条件下的河流水质特征作为标准化期望值,以受人类活动强度较高的河流水质或监测样点水质的特定分位数的水质特征作为标准化阈值。这类综合评估的结果一方面能够更加符合流域自身特点及背景特征,使得管理目标不至过高,适用于河流管理的绩效评估;另一方面该方法能使河流水质空间差异显示出更好的区分度,能更好地协助管理者迅速定位流域亟需治理的河流或河段,使得河流管理更有针对性。在本研究中伊逊河上游为大面积草地,其土壤与植被向河流中输入大量腐殖质,使得河流中高锰酸盐指数显著上升,即使在自然条件下,该指标也仅达到Ⅲ类水质标准,这一河流本底特征通过固定水质标准的 WQI 评估后综合水质仅达到良好水平,而管理部门对此也无法进行有效的改善。而对于河流水环境的管理以及管理绩效而言,管理部门更需要一种水质空间差异区分度良好,能够有效反映人类活动对河流水环境影响的评估方法,ETI 方法通过考虑流域本底特征,对河流水质进行相对情况进行评价的评估标准能够帮助管理者弱化河流本底特征的影响,提高流域水质空间差异的区分度,使管理部门能更有针对性的对受人类活动影响的河流进行治理。此外,ETI 的评价方法也可以纳入更多暂时未明确设置水质标准的指标,例如生物指标(浮游植物、浮游动物、大型底栖动物和鱼类等)^[7, 12],使得河流健康评价的指标更丰富、全面。但由于该类方法指标标准化过程中多以流域自身特征为参照标准,其评估结果不具备与其他河流评估结果的可对比性。

相反,WQI 评价方法的评估标准较为固定,依据各水质指标对水健康的潜在危害和影响进行评分、设置指标权重^[20-21],是一种基于水质真实情况的评估方法。鉴于此,WQI 的评估结果可以利用于河流水质时间变化或河流水质管理效果的评价上。通过对水质绝对值的评估可以了解河流水质的真实情况,能够使管理部门在河流水环境长期管理后,得到河流水质的改善情况,对监测河流水质长期变化以及考核河流管理成效有重要作用。在 WQI 评估中,伊逊河评估结果显示为一般等级,说明伊逊河的水质仍需要加强治理,在通过一段长期的治理后,可以通过 WQI 综合评价结果与治理前的水质评估结果进行比较,得到河流水质长期的变化,检验河流管理的成效。

4 结论

通过使用 ETI 和 WQI 两种水质综合评价方法对伊逊河水质的评估发现:(1) ETI 的评估结果显示伊逊河水质整体状况为良好等级,各样点水质分布于 4 个等级上;WQI 的评估结果显示伊逊河水质整体状况为一般等级,各样点水质分布于 2 个等级上。(2) 伊逊河自上游至下游水质显著下降,特别是在 ETI 评估中,由优秀等级变为差等级,这与河流中下游大面积的农业用地和城镇用地密切相关。(3) 针对伊逊河水质的管理应在以下几个方面做出改善,确保流域上游林地和草地的覆盖率和植被质量,尽量减少农业用地和建设用地的侵占;应不断提高流域中下游地区农业用地的化肥使用效率,逐步降低化肥的使用量,至少达到滦河流域平均水平;对于下游隆化县与承德市双滦区应不断加强污染企业的污水处理技术,并逐步将污染企业向远离河岸带的方向迁移。(4) 两种评价方法的评估结果具有显著的相关性,说明两种方法都能较好地显示出伊逊河水质的空间差异性。在河流水环境管理中,ETI 作为一种水质相对值评估方法,能更好体现流域内水质差异的区分度,便于管理者迅速定位流域内亟需治理的河流或河段,同时能够根据河流自身特征制定管理目标,可作为河流管理绩效评估的有效手段;而 WQI 作为一种水质绝对值评估方法,更适用于河流长期的水质变化评估,对河流经长期治理后的管理效果评价起到重要作用。

参考文献 (References):

- [1] Babel M S, Pandey V P, Rivas A A, Wahid S M. Indicator-based approach for assessing the vulnerability of freshwater resources in the Bagmati

- River Basin, Nepal. *Environmental Management*, 2011, 48(5): 1044-1059.
- [2] John V, Jain P, Rahate M, Labhasetwar P. Assessment of deterioration in water quality from source to household storage in semi-urban settings of developing countries. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(2): 725-734.
- [3] Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, Dudgeon D, Prusevich A, Green P, Glidden S, Bunn S E, Sullivan C A, Liermann C R, Davies P M. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [4] 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 吕兴菊, 薛力强, 储昭升. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响. *生态学报*, 2018, 38(3): 876-885.
- [5] 富天乙, 邹志红, 王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水质评价研究. *环境科学学报*, 2014, 34(2): 473-480.
- [6] 王珺博. 综合水质标识指数法(WQI)在永定河石景山段水质评价中的应用. *环境与发展*, 2017, 29(3): 42-43.
- [7] 江源, 廖剑宇, 刘全儒, 康慕谊. 东江河流生态健康评价研究. 北京: 科学出版社, 2015.
- [8] 杨柳, 宋健飞, 宋波, 王汝舵, 王晓曦. 主要污染物水质标识指数法在河流水质评价的应用. *环境科学与技术*, 2015, 38(11): 239-245.
- [9] 王敏, 唐景春, 朱文英, 梁霍燕, 王如刚. 大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响. *生态学报*, 2012, 32(14): 4535-4543.
- [10] Bordalo A A, Teixeira R, Wiebe W J. A water quality index applied to an international shared river basin: the case of the Douro River. *Environmental Management*, 2006, 38(6): 910-920.
- [11] 张亚丽, 周扬, 程真, 姚志鹏, 申剑, 王潇磊. 不同水质评价方法在丹江口流域水质评价中应用比较. *中国环境监测*, 2015, 31(03): 58-61.
- [12] Cheng X, Chen L D, Sun R H, Kong P R. Land use changes and socio-economic development strongly deteriorate river ecosystem health in one of the largest basins in China. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 376-385.
- [13] Sun W, Xia C Y, Xu M Y, Guo J, Sun G P. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 306-312.
- [14] 刘明喆, 张辉, 谭林山, 郭丽峰. 滦河流域水生态补偿机制初探. *环境保护*, 2016, 44(16): 50-53.
- [15] 郭智明. 滦河十四个断面大型底栖无脊椎动物的调查和水质评价. *环境科学*, 1984, 5(04): 39-45.
- [16] 李莹, 黄少樑. 滦河流域未来土地利用变化情景的水文响应. *生态学杂志*, 2016, 35(07): 1970-1980.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] Hosen J D, McDonough O T, Febria C M, Palmer M A. Dissolved organic matter quality and bioavailability changes across an urbanization gradient in headwater streams. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(14): 7817-7824.
- [19] Koçer M A T, Sevgili H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 672-681.
- [20] Pesce S F, Wunderlin D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba city (Argentina) on Suquia river. *Water Research*, 2000, 34(11): 2915-2926.
- [21] Ramesh S, Sukumaran N, Murugesan A G, Rajan M P. An innovative approach of Drinking Water Quality Index—A case study from Southern Tamil Nadu, India. *Ecological Indicators*, 2010, 10(4): 857-868.
- [22] Feio M J, Norris R H, Graça M A S, Nichols S. Water quality assessment of Portuguese streams: regional or national predictive models? *Ecological Indicators*, 2009, 9(4): 791-806.
- [23] Ding J, Jiang Y, Fu L, Liu Q, Peng Q Z, Kang M Y. Impacts of land use on surface water quality in a Subtropical River Basin: a case study of the Dongjiang River Basin, southeastern China. *Water*, 2015, 7(8): 4427-4445.
- [24] Gardner K K, McGlynn B L. Seasonality in spatial variability and influence of land use/land cover and watershed characteristics on stream water nitrate concentrations in a developing watershed in the Rocky Mountain West. *Water Resource Research*, 2009, 45(8): W08411.
- [25] Lenat D R, Crawford J K. Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina Piedmont streams. *Hydrobiologia*, 1994, 294(3): 185-199.
- [26] 承德市统计局, 国家统计局承德调查队. 承德统计年鉴 2017. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [27] Alberti M, Booth D, Hill K, Coburn B, Avolio C, Coe S, Spirandelli D. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: an empirical analysis in Puget lowland sub-basins. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 345-361.
- [28] Lee S, Ellis C D, Kweon B S, Hong S K. Relationship between landscape structure and neighborhood satisfaction in urbanized areas. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 85(1): 60-70.
- [29] 刘怡娜, 孔令桥, 肖燧, 郑华. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. *生态学报*, 2019, 39(3). DOI: 10.5846/stxb201801130100.