

泰山黄前流域生态系统健康评价

李浩宇¹,段炳志²,徐鹏³,董小花⁴,孟令超⁵,谢清华⁶,颜宏亮^{7*}

1. 绥化学院 农业与水利工程学院, 黑龙江 绥化 152061
2. 山东省胶东调水管理局 东营分局, 山东 东营 257000
3. 淮委邳州河道管理局, 江苏 徐州 221000
4. 滨州市小清河管理局, 山东 滨州 256600
5. 天津大学 里仁学院, 天津 300000
6. 枣庄市水利勘测设计院, 山东 枣庄 277100
7. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018

摘要: 本文以泰山黄前流域为研究对象, 从水环境及其服务功能、生物、生境和人类活动影响四个方面, 含有 29 个具体指标构建了流域生态系统健康评价指标体系, 确定具体指标的分级标准, 使用健康标准来衡量指标, 并利用序关系分析法确定指标权重, 最后采用综合健康指数来整体评价了黄前流域的健康状况, 经过计算得到黄前流域的综合健康指数为 4.8932, 健康状况为临界状态, 并对结果进行分析与讨论, 提出相应的措施与建议。

关键词: 泰山黄前流域; 生态系统健康; 指标体系; 评价

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)06-0846-06

The Health Assessment on Ecosystem of Huangqian Reservoir in Mountain Tai

LI Hao-yu¹, DUAN Bing-zhi², XU Peng³, DONG Xiao-hua⁴, MENG Ling-chao⁵, XIE Qing-hua⁶, YAN hong-liang^{7*}

1. College of Agriculture and Water Engineering/Suihua University, Suihua 152061, China
2. Dongying Branch/Water Scheduling Administration of Jiaodong Shandong Province, Dongying 257000, China
3. Huaiwei River Administration of Pizhou City, Xuzhou 221000, China
4. Administration Bureau of Xiaoqinghe in Binzhou City, Binzhou 256600, China
5. Liren College/Tianjin University, Tianjin 300000, China
6. Institute of Water Survey Design in Zaozhuang, Zaozhuang 277100, China
7. College of Water Civil Engineering, Tai'an 271018, China

Abstract: This paper took Huangqian watershed in Mount Tai as an object of study, from four aspects including the water environment and its service function, biology, habitat and human activities, containing 29 specific indexes to construct the health evaluation index system of ecosystem and determined the classification standard of them, then measured them by health standard and determined the index weight by rank correlation analysis, finally, used ecological comprehensive health index to evaluate the comprehensive evaluation of the health status of Huangqian watershed, which was 4.8932 as a result, it was in a critical state, and through the analysis and discussion, we can propose corresponding measures and suggestions.

Keywords: Huangqian watershed in Mount Tai; ecosystem health; index system; evaluation

泰山黄前流域地处东经 117°4'~117°22'与北纬 36°16'~36°28'之间, 属于黄河流域。流域内具有一座中型水库, 总库容为 $8.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。流域内多年平均降水量为 783 mm, 河流多年平均径流深为 254 mm, 多年平均径流量 $5.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。黄前流域总面积为 292.2 km², 流域内森林覆盖率 40~50%, 90%~95% 植被情况良好, 水土流失较轻, 多年平均输砂模数 300~500 t/km², 流域内土壤侵蚀达到中度侵蚀的面积为 93.01 km², 占流域总面积的 31.83%。流域内有泰安市辖的四个乡镇、三个国营林场。总共 86 个行政村, 人口密度为 260 人/km², 人均年纯收入 5100 元。

1 研究方法

1.1 流域生态系统健康评价指标体系的构建

流域生态系统具有一定的复杂性, 它不仅包括生境与生物两个方面, 更多的是要受到人类的干扰, 这使生态健康评价的工作同样呈现着复杂性。根据流域生态系统的特点, 在建立评价体系时要遵循以下几个原则: 即单目标与多目标相结合的原则, 定性分析和定量分析相结合的原则, 模糊性

收稿日期: 2015-12-11

修回日期: 2016-02-25

基金项目: 绥化学院科学技术研究重点项目(K1401008)

作者简介: 李浩宇(1987-),男,硕士研究生,从事水利水电工程专业的教学与研究工作. E-mail:lihaoyu000111@163.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:ss-yhl@163.com

和精确性相结合的原则,权威决策和专家群决策相结合的原则,现状分析和预测研究相结合的原则^[1]。根据以上原则,评价指标体系从以下四个方面建立:即流域的水环境及其服务功能方面(W),流域生物方面(B),流域生境方面(H)和人类活动对流域产生的影响方面(M)这4大类型的一级指标,并细化为29项二级指标^[2-5]。其中H为:植被覆盖率(%)、湿地保留率(%)、河岸稳定性(%)、河床稳定性、土壤侵蚀模数(t/(km²·a))、水土流失面积率(%)、河流蜿蜒性。B为:水生生物多样性指数、水生动物完整性指数、生物量变化率(%)、陆生生物多样性指数、斑块密度、外来物种威胁程度。W为:生态需水满足率(%)、水质安全、水景观舒适度、水域面积率(%)、水资源开发利用(%)、河流年径流深(mm)、防洪安全。M为:污水处理率(%)、农药施用强度(kg/hm²)、化肥施用强度(kg/hm²)、政策法规执行力度、平均受教育年限(年)、人口密度(人/km²)、恩格尔系数(%)、人口健康状况(岁)、人均年纯收入(元)。

1.2 评价标准的建立

评价指标确定后,采用健康标准来度量指标属于何种健康状况,把这一标准分为5个级别,依次为“很好、较好、临界、疾病和恶疾”,分别对应的标准值为8~10、6~8、4~6、2~4和0~2。指标分级标准的确定所采用的方法为:(1)依据国家以及地方的标准和行业规范;(2)参考国内外相关的研究成果;(3)依据历史背景资料来确定;(4)专家咨询判断法,根据专家的经验确定指标分级的标准。表1为指标健康标准分级表。

表 1 指标分级标准
Table 1 The grade of indicators

评价指标 The evaluation index	评价标准 Evaluation criterion				
	8~10 良好 Favorable	6~8 较好 Better	4~6 临界 Critical	2~4 疾病 Illness	0~2 恶疾 Disease
植被覆盖率(%)	75~100	50~75	25~50	10~25	<10
湿地保留率(%)	>30	20~30	15~20	10~15	<10
河岸稳定性(%)	稳定 无明显侵蚀	较稳定 侵蚀区域<20%	较不稳定侵蚀区域 20%~50%	不稳定 侵蚀区域 50%~80%	极不稳定 侵蚀区域 >80%
河床稳定性	极其稳定,不存在河床较稳定,不明显河床的较不稳定,明显河床的不稳定,很明显河床极其不稳定,严重河床的侵蚀或淤积				
土壤侵蚀模数 t/(km ² ·a)	<500	500~2500	2500~5000	5000~8000	>8000
水土流失面积率(%)	<10	10~30	30~50	50~70	70
河流蜿蜒性	3~4	2~3	1.4~2	1.2~1.4	1~1.2
水生生物多样性指数	>3.0	2.0~3.0	1.0~2.0	0~1.0	0
水生动物完整性指数	>60	50~60	40~50	30~40	<30
生物量变化率(%)	生物量增加速率>10	增加不明显,速率0~10	减少不明显,速率0~10	减少,速率10~50	明显减少,速率>50
陆生生物多样性指数	>3.0	2.0~3.0	1.0~2.0	0~1.0	0
斑块密度(个/km ²)	<2.0	2.0~10.0	10.0~20.0	20.0~40.0	>40.0
外来物种威胁程度	低	较低	中	较高	高
生态需水满足率(%)	80~100	60~80	40~60	20~40	<20
水质安全	I	II	III	IV	V
水景观舒适度	8.0~10.0	6.0~8.0	4.0~6.0	2.0~4.0	0~2.0
水域面积率(%)	12~15	8~12	5~8	3~5	1~3
水资源利用率(%)	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
河流年径流深(mm)	>1000	300~1000	100~300	50~100	<50
防洪安全	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
污水处理率(%)	>95	95~80	80~60	60~40	<40
农药施用强度(kg/hm ²)	0~10	10~15	15~25	25~35	35~40
化肥施用强度(kg/hm ²)	0~350	350~700	700~1050	1050~1400	1400~1750
政策法规执行力度	全面贯彻,积极落实	比较认真贯彻落实	部分贯彻落实	简单应付,执行不利	完全搁置
平均受教育年限(年)	>12	9~12	9	5~7	<5
人口密度(人/km ²)	<200	200~400	400~600	600~800	>800
恩格尔系数(%)	<30	30~40	40~50	50~60	>60
人口健康状况(岁)	>85	85~80	80~75	75~70	<70
人均年纯收入(元)	10000~20000	7000~10000	4000~7000	2000~4000	<2000

1.3 指标的标准化处理

由于每个指标的量纲是不统一的，所以在评价其健康状况时，指标之间难以作出准确的比较，并且在后期也难以统一计算，所以要将指标进行标准化的处理，具体处理的主要思路为：

假定 x_i 为指标 a_i 的量化值，并且处于第 j 级的标准里，则先计算出 x_i 对于第 j 级标准两端标准值 $a \sim b$ 的隶属度 k ，公式为：

$$k_a = \frac{x_i - a}{b - a} \tag{1}$$

$$k_b = 1 - k_a \tag{2}$$

由计算得到的隶属度 k_a 或 k_b ，经过相反的计算过程，可计算出指标 a_i 在第 j 级的标准里 $a \sim b$ 上的健康标准值 E_i ，指标的健康标准值计算结果见表 4。

1.4 指标权重的确定

本文将采用一种计算方便快捷并且能够准确确定指标权重的方法—序关系分析法应用于流域生态系统健康评价^[6,7]，运用该方法在进行权重确定的主要思路如下：

1.4.1 排定序关系 如果 a_i 相对于它上层准则 a 的重要程度大于同层的 a_j 时，则记为 $a_i \succ a_j$ 。假定同层指标 a_1, a_2, \dots, a_n 相对于其上层准则 a 具有如下关系

$$a_1^* \succ a_2^* \succ \dots \succ a_n^* \tag{3}$$

时，称指标 a_1, a_2, \dots, a_n 之间按“ \succ ”确立了一定的序关系。可以用 a_i^* 表示 $\{a_i\}$ 按一定序关系“ \succ ”排定顺序后的第 i 个指标 ($i = 1, 2, \dots, n$)。

使指标集 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 按照下列步骤建立序关系：

(1) 专家在指标集 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 中，选出某一个指标（唯一）认为其对于其上层准则是最重要的，记为 a_1^* ；

(2) 专家在剩余的 $n-1$ 个指标中，选出某一个指标（唯一）认为其对于其上层准则是最重要的，记为 a_2^* ；

... ..

(m) 专家在剩余的 $n-(m-1)$ 个指标中，选出某一个指标（唯一）认为其对于其上层准则是最重要的，记为 a_m^* ；

... ..

(n) 专家经过 $n-1$ 次选择后剩下的指标记为 a_n^* 。

如此，就确定了序关系(3)式。接下来的工作就是确定每个指标对于其上层准则的权重系数。

1.4.2 确定 a_{m-1} 与 a_m 之间相对于上层准则的重要性比较 假定专家对于指标 a_{m-1} 与 a_m 的重要性之比

$$\omega_{m-1} / \omega_m \text{ 的判定为 } \omega_{m-1} / \omega_m = r_m, (k = n, n-1, n-2, \dots, 3, 2) \tag{4}$$

对于比值 r_m 的赋值参见表 2。

表 2 r_m 赋值表
Table 2 Assignment value of r_m

r_m	说明 Instructions
1.0	指标 r_m 与指标 r_m 同等重要
1.2	指标 r_m 比指标 r_m 略微重要
1.4	指标 r_m 比指标 r_m 显然重要
1.6	指标 r_m 比指标 r_m 强烈重要
1.8	指标 r_m 比指标 r_m 极其重要

1.4.3 指标权重的计算 若专家给出 r_m 的赋值满足下关系式

$$r_{m-1} > 1/r_m, (m = n, n-1, n-2, \dots, 3, 2) \tag{5}$$

则 ω_n 为

$$\omega_n = \left(1 + \sum_{m=2}^n \prod_{i=m}^n r_i \right)^{-1} \tag{6}$$

而

$$\omega_{m-1} = r_m \omega_m, m = n, n-1, n-2, \dots, 3, 2 \tag{7}$$

根据公式就可算得 $\omega_n (n = 1, 2, 3, \dots)$ 的权重。指标的权重计算结果见表 4。

1.5 评价结果的确定

本文使用健康指数来从整体上评价流域生态健康状况，健康指数的分级与描述见表 3。通过序关系分析法确定 29 项指标的权重 $\omega_i (i=1, 2, 3, \dots, 29, \sum_{i=1}^{29} \omega_i = 1)$ ，根据各指标健康标准值及权重，

确定流域健康指数。计算公式为： $E = \sum_{i=1}^{29} \omega_i E_i$ (8)

式中： E ——流域生态健康指数；
 ω_i ——第 i 项指标的权重值；
 E_i ——第 i 项指标的健康标准值。

表 3 流域综合健康指数分级表
Table 3 The classification of the comprehensive health index

健康级别 Health level	良好 Favorable	较好 Better	临界 Critical	疾病 Illness	恶疾 Disease
健康标准	8.0~10.0	6.0~8.0	4.0~6.0	2.0~4.0	0~2.0
描述	流域内生境非常稳定，生物多样性极其丰富，具有很强的自净能力和生态系统的完整性	流域内生境比较稳定，生物多样性比较丰富，具有比较强的自净能力和生态系统的完整性	流域内生境处于不太稳定的临界状态，生物多样性部分丧失，虽有一定的自净能力，但整体来讲生态系统已经比较脆弱	流域内生态系统已经恶化，自然恢复的难度较大，但仍有通过人工恢复的可能性	流域内生态系统恶化严重，基本功能丧失，即使采取人工恢复，恢复的可能性也较小

流域生态系统综合健康指数的计算结果见表 4。

2 结果分析与建议

根据指标的量化，经过相应计算，确定了每个指标所对应的健康标准，计算得出黄前流域的综合健康指数为 4.8932，健康状况处于临界状态，为更好的进行流域生态的保护与规划、水资源的合理开发与利用和人类社会的可持续发展，针对评价结果进行分析，并提出相应的建议。

2.1 结果分析

(1) 黄前流域内, 生境指标处于恶疾的健康范围内的指标只有湿地保留率, 流域内天然湿地较少, 大部分为河流形成, 但黄前流域处于黄河下游区域, 所以水量自然较少, 流域内人工湿地比较大型的也就是水库, 所以总体来讲, 流域内湿地面积很小; 处于临界范围内有水土流失面积率和河流蜿蜒性, 虽然流域内水土流失并不严重, 但也不可掉以轻心, 如果不注重保持水土, 在未来一段时间内可能会加重水土流失; 河流的蜿蜒程度会受到人为因素的干扰, 由于流域内有水库大坝等水利工程对河流的蜿蜒性有一定的影响。

(2) 从生物指标来看, 水生生物多样性处于疾病的状态, 这可能与水体污染有着直接的关系, 而陆生物多样性随处于临界状态, 但好于水生生物的状况, 更能说明流域的水污染状况是不容乐观的, 对于外来物种的影响几乎没有, 所以处于良好的状态。

表 4 黄前流域综合健康指数计算表

Table 4 The computation of comprehensive healthy index of Huangqian river basin

一级指标及权重 Primary index and weight	二级指标层 Secondary index layer	二级指标权重值 Secondary index weights	指标归一化权重值 E_i Index normalized weights	指标量化值 Indicator quantitative values	指标健康标准值 E_i Indicators of health standard	综合健康指数 Comprehensive health index
生境指标 0.2683	植被覆盖率(%)	0.2730	0.0732	50	6.00	0.4392
	湿地保留率(%)	0.1706	0.0457	<10	1.00	0.0457
	水土流失面积率(%)	0.1422	0.0382	31.83	5.80	0.2216
	河岸稳定性(%)	0.1422	0.0382	20	6.00	0.2292
	河床稳定性	0.1184	0.0318	较稳定	7.00	0.2226
	土壤侵蚀模数 $t/(km^2 \cdot a)$	0.0987	0.0265	400	8.40	0.2226
	河流蜿蜒性	0.0549	0.0147	1.57	4.57	0.0672
	水生生物多样性指数	0.2813	0.0906	0.41	2.82	0.2555
生物指标 0.3219	水生动物完整性指数	0.2344	0.0755	44	4.80	0.3624
	生物量变化率(%)	0.1953	0.0629	增加不明显, 速率 0~10	7.00	0.4403
	陆生物多样性指数	0.1395	0.0448	1.44	4.88	0.2186
	斑块密度(个/ km^2)	0.0872	0.0281	12.14	5.57	0.1565
	外来物种威胁程度	0.0623	0.0201	低	9.00	0.1809
水环境及其 服务功能指 标 0.2235	生态需水满足率(%)	0.2760	0.0617	27	2.70	0.1666
	水质安全	0.2300	0.0514	III	5.00	0.2570
	防洪安全	0.0594	0.0133	1.0	10.0	0.1330
	水资源开发利用(%)	0.1437	0.0321	89.3	1.07	0.0343
	河流年径流深(mm)	0.1198	0.0268	254	5.54	0.1485
	水域面积率(%)	0.0998	0.0223	2.3	1.30	0.0290
	水景观舒适度	0.0713	0.0158	6.2	6.20	0.0980
	污水处理率(%)	0.2511	0.0468	2.0	0.10	0.0047
	农药施用强度 (kg/hm^2)	0.1794	0.0334	10.2	7.92	0.2645
	化肥施用强度 (kg/hm^2)	0.1495	0.0278	272	8.45	0.2349
人类活动影 响指标 0.1863	人口密度(人/ km^2)	0.1246	0.0232	260	7.40	0.1717
	政策法规执行力度	0.0779	0.0145	较认真贯彻落实	7.00	0.1015
	平均受教育年限(年)	0.0648	0.0121	6.0	3.00	0.0363
	恩格尔系数(%)	0.0648	0.0121	38.3	6.34	0.0767
	人口健康状况(岁)	0.0541	0.0101	76	4.40	0.0444
人均年纯收入(元)	0.0338	0.0063	5100	4.73	0.0298	
合计		4.0000	1.0000			4.8932

(3) 从水环境及其服务功能指标来看, 生态需水满足率与水域面积率呈现恶疾的状态, 从我国

华东北地区缺水的角度来看,生态需水满足程度较低不足为奇,山东地区人口较多,生活生产用水量,挤占生态用水的程度自然较大,而水域面积较小也是北方地区缺水的体现;水资源开发利用也呈现着恶疾的状态,说明人类对水资源的不合理的开发利用正处于严重的形势,对水资源的浪费也是愈加严重。

(4)从人类活动影响指标来看,污水处理率处于恶疾的状态,据相关资料统计与实地调查,黄前流域人们的日常生活中,仍广泛使用着含磷洗涤剂,再加上流域内各类宾馆、饭店以及大量游客产生的生活垃圾、废水,污染量相当巨大。所产生的垃圾、污水、废渣大都没有进行归类、收集与无害化处理,直接倾倒、丢弃于村头片尾、河道两旁,汛期随洪水冲入水库,对水体是直接、严重的污染;流域内居民多数为农村人口,农村受教育问题也是比较严峻,大部分人都未完成九年义务教育,这部分人多为老年人与中年人,部分青壮年许多初中学业还未完成就外出打工。

2.2 建议

(1)湿地具有涵养水源、维持生态平衡、保持生物多样性和局部气候的调节等作用,对流域的生态环境具有十分重要的意义,黄前流域内天然湿地较少,主要体现在河流上,而人工湿地也主要体现在水库上,客观来说湿地面积较少,也并没有从保护流域水生态环境的角度上刻意去保护自然湿地和建立人工湿地,所以在今后的发展规划上可以将湿地考虑在内,在水利与生态的投资上加大这一块力度,建立人工湿地不仅可以保护生态,同样可以作为流域内的水景观。对于河道的整治工程,尽量不要使用裁弯取直、堤防护砌等方式,在保证防洪安全的前提下,尽可能的保持河流的自然形态,具有重要意义。

(2)尽快建立权威高效的水资源与水环境的管理保护体制,水资源与水环境的管理保护涉及面广、牵扯各方面的利益,必须发挥政府行政、企业团体和人民群众的作用,从法律政策、经济投资、工程建设、宣传教育等各个方面采取措施和对策,方可取得实效。积极推进生活垃圾向无害化、减量化、资源化发展,加快调整产业结构,禁止发展高污染的工业企业,有序发展低污染工业企业,积极发展生态旅游等第三产业。

(3)积极调整农业种植结构,大力推广适用的生态农业生产模式,努力提高农产品科技含量和附加值;适度发展林果业,积极发展生态林、水源涵养林。加快改变农民群众的不良生产生活习惯,控制化肥的施用量,增施农家肥;推广使用生物农药、植物农药,高效、低毒和低残留化学农药;使用节水灌溉的技术,减少挤占生态用水的情况,减少化肥、农药向水体的流失。加快实施生态水利工程建设,推进水源地水土流失综合治理,以小流域为单元,采取坡面治理、沟道治理、生态修复等措施,加强水源保护,积极向流域的居民宣传生态水利的理念。

(4)要尽快改变教育落后的状况,必须从制度的层面给以必要的倾向,当地政府在不断增加教育投入的同时,要根据公共教育财政体制的要求,调整教育支出结构,加大对农村教育的投入力度,建立规范的财政转移支付制度、公平的公立学校资源分配制度和贫困生助学制度,坚持对贫困地区、薄弱学校和困难群体进行倾斜。

参考文献

- [1] 王文杰,张哲,王维,等.流域生态健康评价框架及其评价方法体系研究[J].环境工程技术学报,2012,2(4):271-277
- [2] 刘国彬,胡维银,许明祥.黄土丘陵区小流域生态经济系统健康评价[J].自然资源学报,2003,18(1):44-49
- [3] 赵彦伟,杨志峰.河流健康概念、评价方法与方向[J].地理科学,2005,25(1):119-124
- [4] 龙笛,张思聪,樊朝宇.流域生态系统健康评价研究[J].资源科学,2006,28(4):38-44
- [5] 刘晓燕.构建黄河健康生命的指标体系[J].中国水利,2005,21:28-32
- [6] 王学军,郭亚军,兰天.构造一致性判断矩阵的序关系分析法[J].东北大学学报:自然科学版,2006,27(1):115-118
- [7] 陈陌,郭亚军,于振明.改进型序关系分析法及其应用[J].系统管理学报,2011,20(3):352-355