

ICS

CCS 点击此处添加 CCS 号

# 团 体 标 准

T/CSES XXXX—XXXX

## 水环境承载力评估技术指南

Technical guidelines for assessment of Water Environment Carrying Capacity

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国环境科学学会 发布



# 目 次

前 言 ..... I

引 言 ..... II

1 适用范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语与定义 ..... 2

4 总体原则 ..... 3

5 工作程序 ..... 3

6 总体技术要求 ..... 4

附录 A（规范性） 评估指标解释 ..... 11

附录 B（规范性） 常见权重确定方法 ..... 18



## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由北京师范大学环境学院提出。

本文件由中国环境科学学会归口。

本文件主要起草单位：

本文件主要起草人：

## 引 言

流域/区域水环境承载力是表征一个地区水系统所能承受社会经济活动所带来压力的阈值，是指导区域规划与管理工作的重要依据。2015年9月，中共中央、国务院印发的《生态文明体制改革总方案》中明确提出“以资源环境承载力能力评价结果作为空间规划的基本依据”。为贯彻执行国家《生态文明体制改革方案》及新修订的《中华人民共和国水污染防治法》的相关要求，支撑水环境承载能力监测评价体系建设，亟待开展水环境承载力评价系统化与规范化工作。

环境承载力已成为生态文明体制改革的重要抓手，而水环境承载力是环境承载力的主要组成（分量）部分之一。为科学界定水环境承载力概念及内涵、明确评估对象，全面支撑流域/区域水环境承载力评估工作，特编制本文件。

# 水环境承载力评估技术指南

## 1 适用范围

本文件适用于江河、湖泊、水库、运河、渠道等已划定水功能区的县域、省域和生态区的水环境承载力评估，生态区包括生态功能区、城市/城市群和自然保护区。

本文件规定了流域/区域水环境承载力评估的相关术语、总则、工作程序、评估内容、评估方法及技术要求。

本文件适用于行政区域规划与管理部门的水环境承载力评估工作。

本文件不适用于污染物非均匀混合的大型湖（库）、营养状态指数 $>50$ 的湖（库）以及平均水深 $<10\text{m}$ 且水体交换系数 $<10$ 的湖（库）。

尚未规划的水环境功能区的区域可参照本文件执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境

HJ/T 91 地表水和污水监测技术规范

GB 3838 地表水环境质量标准

HJ 831 淡水水生生物水质基准指定技术指南

GB 8978 污水综合排放标准

### 3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### **水环境承载力** water environment carrying capacity

某一时期,某种环境状态下,在一定技术经济条件下,某一水系统功能结构不被破坏前提下,可持续为人类活动提供支持能力的阈值,包括水资源供给能力、水环境容量与水生态承载力三个分量。

#### 3.2

##### **水环境承载力大小** value of water environment carrying capacity

自然水系统能够为人类活动的支撑能力的大小,与人类活动给自然水系统带来的压力无关。

#### 3.3

##### **水环境承载力状态** status of water environment carrying capacity

社会经济子系统给自然水系统带来的压力超过水环境承载力的程度,反映的是超载程度或者承载状态,与人类活动给自然水系统带来的压力有关。水环境承载力承载状态可通过承载率(即人类活动给自然水系统带来的压力比上对应的水环境承载力分量指标)表征,也可以通过综合评价方法评价。

#### 3.4

##### **水环境承载力开发利用潜力**

##### **development and utilization potential of water environment carrying capacity**

在社会经济子系统的支持下水环境承载力可开发利用的潜势。一般而言,水环境承载力越大,其开发利用潜力越大;超载越严重,开发利用潜力越小;相应强度指标越大,开发利用潜力越大;而科技水平、经济水平、人力资源水平与基础设施水平越高,水环境承载力开发利用潜势越大。水环境承载力开发利用潜势评价指标通常从水环境承载力大小、承载状态、强度指标及社会经济基础设施等方面构建,并利用综合评价方法评价。



## 4 总体原则

### 4.1 系统性原则

根据水环境承载力的内涵，评估中的指标选取应能反映社会经济系统对水环境的压力，以及区域水环境对社会经济系统的支持能力。

### 4.2 代表性原则

在保证科学性的基础上，评估应尽可能简化，应选取代表性强的指标表征不同水环境承载力分量，避免指标重复。

### 4.3 可获取原则

确保评估工作的科学性、适用性，必须加强与相关基础数据的统筹衔接，评估数据应当可获取，评估方法简单可操作性。

### 4.4 因地制宜原则

在遵循评估体系完整性的基础上，充分考虑不同区域、不同尺度上的差异性，可适当结合当地实际情况与特征，因地制宜地丰富完善指标。

## 5 工作程序

流域/区域水环境承载力评估按图 1 所示的程序进行。

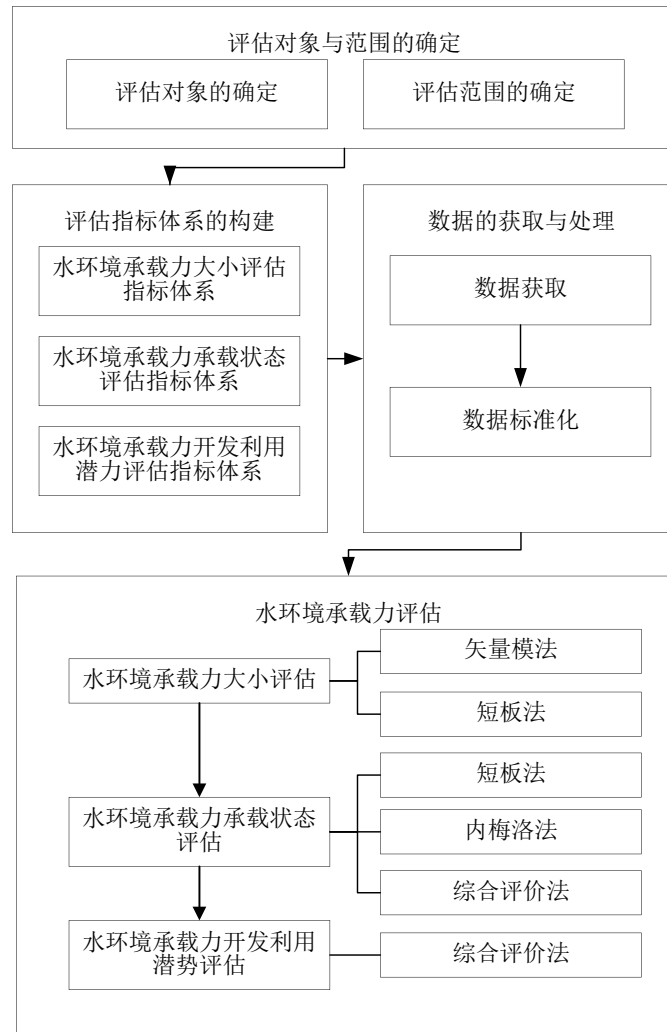


图 1 工作程序

## 6 总体技术要求

### 6.1 评估对象与评估范围的确定

#### 6.1.1 评估对象

根据评估对象与目的的不同，确定水环境承载力评估内容。水环境承载力大小、水环境承载力状态、水环境承载力开发利用潜势等的评估对象具体参见 3.2 至 3.4 章节。

#### 6.1.2 评估范围

##### 6.1.2.1 空间范围

流域/区域水环境承载力评估的空间范围可以为整个流域或区域，以行政单元（省、地市、区县）为评价单元。将流域或区域划分为不同评价单元后进行评估更能体现区域空间的差异性特征。

### 6.1.2.2 时间范围

流域/区域水环境承载力评估的时间范围可以考虑以年或季节为时间尺度进行评估。其中，区域年际评估的时间尺度至少 5 年以上；区域季节性评估的时间尺度按照水域特点可以分为平水期、枯水期、丰水期共 3 种时期。

## 6.2 评估指标体系构建

根据流域/区域水环境以及社会经济的年际变化，可以对流域/区域水环境承载力大小、水环境承载力状态以及水环境承载力开发利用潜力进行评估，具体指标体系选取可根据待评估区域/流域具体特征与数据获取情况，在推荐指标体系基础上选取。

### 6.2.1 水环境承载力大小评估推荐指标体系

水环境承载力大小评估从水资源供给能力、水环境容量、以及水生态承载力三个方面，构建流域/区域水环境承载力大小评估指标体系，具体评估指标体系如表 1 所示。

表 1 水环境承载力大小评估推荐指标体系

指标层	分指标层
水环境容量(A)	本地 COD 浓度(A1)
	本地氨氮浓度(A2)
	本地 TP 浓度(A3)
水资源分量(B)	降水量(B1)
	再生水量(B2)
	地表水量(B3)
	地下水量(B4)
水生态分量(C)	湿地面积占比(C4)
	水源涵养能力(C1)
	水质净化能力(C2)
	河流蜿蜒度(C3)

### 6.2.2 水环境承载力承载状态评估推荐指标体系

水环境承载力承载状态的对象是水系统内部社会经济子系统对流域/区域水系统（包括水环境子系统、水资源子系统与水生态系统）的压力超过水环境承载力大小的程度，可从水系统压力指标以及水环境承载力大小两个方面，构建流域/区域水环境承载力大小评估指标体系，具体评估指标体系如表 2 所示。

表 2 水环境承载力承载状态评估推荐指标体系

分类	指标层	分指标层
水系统压力指标	点源排放量(D)	COD 点源排放量(D1)
		氨氮点源排放量(D2)
		TP 点源排放量(D3)
	面源排放量(E)	COD 面源排放量(E1)
		氨氮面源排放量(E2)
		TP 面源排放量(E3)
	水资源利用量(F)	生活用水量(F1)
		工业用水量(F2)
		农业用水量(F3)
	上游来水压力(G)	上游来水 COD 量(G1)
上游来水氨氮量(G2)		
上游来水 TP 量(G3)		
水环境容量(A)	本地 COD 浓度(A1)	
	本地氨氮浓度(A2)	
	本地 TP 浓度(A3)	
水环境承载力指标	水资源分量(B)	降水量(B1)
		再生水量(B2)
		地表水量(B3)
		地下水量(B4)
水生态分量(C)	湿地面积占比(C4)	
	水源涵养能力(C1)	
	水质净化能力(C2)	
		河流蜿蜒度(C3)

### 6.2.3 水环境承载力开发利用潜力评估推荐指标体系

从水环境承载力大小、水环境承载力状态、污染物排放强度与水资源利用强度、区域发展能力四个层面构建流域/区域水环境承载力开发利用潜势评估推荐指标体系，如表 3 所示。

表 3 水环境承载力开发利用潜势评估推荐指标体系

指标层	分指标层
水环境承载力大小	---
水环境承载力状态	---

污染物排放强度与水资源利用强度(H)	水资源	人均生活用水量(H1)
		万元 GDP 水耗(H2)
		万元 GDP COD 排放量(H3)
	水污染物	万元 GDP 氨氮排放量(H4)
		万元 GDP TP 排放量(H5)
区域发展能力(I)		城镇化率(I1)
		人均 GDP(I2)
		第三产业占比(I3)
		环保投资占比(I4)
		污水处理率(I5)

### 6.3 数据获取与处理

#### 6.3.1 数据获取

收集数据时，应保证数据的权威性、准确性、时效性。所需数据参见 6.2 章节，这里无需核算水资源供给能力与水环境容量，大部分指标数据来源于统计年鉴（参见附录 A）。

#### 6.3.2 数据标准化处理

收集数据时，应保证数据的权威性、准确性、时效性。所需数据包括水环境分量、水资源分量、水生态分量、水系统。在分析数据之前，为了消除不同数据之间的量纲不同，需要对数据进行标准化处理。数据标准化方法很多，最常用的有“最小-最大标准化”“Z-score 标准化”等。

##### 6.3.2.1 最大-最小标准化

对效益型指标（数值越大越优指标）标准化处理公式如下：

$$x_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

对于成本型指标（数值越小越优指标）标准化处理公式如下：

$$x_i = \frac{X_{max} - X_i}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

式中： $x_i$ ——数据  $X_i$  标准化处理以后的数值，其大小在[0,1]范围内

$X_{max}$ ， $X_{min}$ —— $X_i$  数据集中的最大值与最小值

##### 6.3.2.2 Z-score 标准化

$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

式中： $x_i$ ——数据  $X_i$  标准化处理以后的数值，其大小在[0,1]范围内；

$\bar{X}$ —— $X_i$  数据集的平均值；

$S$ —— $X_i$  数据集的标准差。

## 6.4 评估方法

### 6.4.1 短板法

短板法适用于水环境承载力大小和水环境超载状态的评估。

短板法源于木桶理论，即木桶的整体效应是由最短模板来决定，短板的尺寸越小，整体效应越差。流域水环境承载力的最关键影响因子限制了大小以及承载状态，因此可以采用短板法评估水环境承载力大小与承载状态，具体评估方法如式 6 所示。

$$\begin{cases} \text{当 } P_i \text{ 为正向指标: } P = \min(P_1, P_2, \dots, P_n) \\ \text{当 } P_i \text{ 为负向指标: } P = \max(P_1, P_2, \dots, P_n) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $P$ ——流域水环境承载力评价结果；

$P_i$ ——第  $i$  种因子评价结果；

$n$ ——影响因子个数。

### 6.4.2 内梅罗法

内梅罗法适用于水环境承载力承载状态的评估。内梅罗指数法克服了平均值法各要素分担的缺陷，兼顾了单要素污染指数平均值和最高值，可以突出水环境承载力大小以及承载状态中最主要的影响因子，计算公式如式 7 和式 8 所示。

$$P = \sqrt{\frac{\bar{P}^2 + P_{max}^2}{2}} \quad (7)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (8)$$

式中： $P$ ——综合承载率；

$\bar{P}$ ——各要素承载率的平均值；

$P_{max}$ ——各要素承载率的最大值；

$P_i$ ——第  $i$  种要素承载率。

### 6.4.3 矢量模法

内梅罗法适用于水矢量模法适用于水环境承载力大小的评估，具体求解方法为：

假设有  $m$  个水平年，或者对于同一水平年而言，假设有  $m$  个不同的分区，在这两种情况下都会有

$m$  个水环境承载力评价价值，设  $m$  个评价价值为  $E_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ )，再设每个评价价值  $E_j$  包括  $n$  个具体指标确定的分量，每个指标的权重为  $W_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )，权重确定方法见附录 B，即有  $E_j (E_{1j}, E_{2j}, \dots, E_{nj})$ 。这样，第  $j$  个水环境承载力的大小可用归一化后的矢量模表示，即：

$$|\Sigma_j| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i \overline{E_{ij}})^2} \quad (9)$$

其中，正影响指标的归一化：

$$\overline{E_{ij}} = \frac{E_{ij}}{\sum_{j=1}^m E_{ij}} \quad (10)$$

负影响指标的归一化：

$$\overline{E_{ij}} = \frac{\frac{1}{E_{ij}}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{E_{ij}}} \quad (11)$$

#### 6.4.4 线性加权法

内梅罗法适用加权求和法适用于水环境承载力承载状态和水环境承载力开发利用潜力的评价。

$$P = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (12)$$

式中： $P$ ——评价结果；

$w_i$ ——第  $i$  种指标权重，常见权重确定方法见附录 B；

$x_i$ ——第  $i$  种指标标准化结果。

#### 6.4.5 隶属度函数法

隶属度函数法是根据模糊数学的原理，进行综合评估，评估模型如式 10 所示，常见的隶属度函数法包括模糊数学方法、突变级数法等。

$$B = W \times R \quad (13)$$

其中： $B$ ——隶属度函数结果，最后归一化处理得到  $B'$ ；

$W$ ——指标权重集， $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ ，常见权重确定方法见附录 B；

$R$ ——为隶属度矩阵。

#### 6.5 评估等级划分

为了更好比较流域/地区水环境承载力的基本情况，可以根据 6.4 章节所得的水环境承载力评估结果进行等级划分。评估分级标准分为评估指标分级标准和评估结果分级标准。根据评估指标分级标准可以确定评估结果分级标准，为定量定性研究水环境承载力状况提供科学依据。流域/区域水环境承载力评估指标分级标准值的拟定遵循以下原则，将评估指标分为最好、较好、一般、较差、最差五个等级。

(1) 对于目前公认的单项分级指标，可以参考国家标准对数据进行分级；

(2) 对于无参考的指标，可以进行区域自身或者与相邻或相似地区进行比较，选取最优值和最劣

值，作为评估指标的上下限，然后进行相应分级。

除了评估分级标准影响评估结果的分级，不同的评估方法对应的评估结果分级标准也有所差异，可以根据评估指标的节点数值，按照与水环境承载力评估相同的方法确定最终的评估结果标准。

## 6.6 评估结果划分

对于流域/区域水环境承载力大小评估结果标准而言，可以按照评估结果分为承载力最小、承载力较小、承载力一般、承载力较大、承载力最大，共五个级别；对于流域/区域水环境承载力状态而言，可以分为承载状态良好、承载状态一般、临界超载、一般超载、严重超载；对于流域/区域水环境承载力开发利用潜势而言，可以分为开发潜势最小、开发潜势较小、开发潜势一般、开发潜势较大、开发潜势最大。划分方法常用五级等差划分、控制图法、全国样本扩充分级法等。

全面系统分析水环境承载力评价结果，发现水环境承载力大小与承载状态的时空演化分布规律，识别水环境承载力超载原因，开展水环境承载力大小、状态与开发利用潜力分区；在此基础上，为流域区域水环境承载力可持续开发利用提出具体建议。



**附录 A**  
**(规范性)**  
**评估指标解释**

**A.1 水环境容量 (A)**

由于 COD、氨氮与 TP 浓度等水环境容量指标是较为基础的概念，故省略其计算方法。

数据来源：中国/地区统计年鉴、水资源公报。

**A.2 水资源分量 (B)**

a) 降水量 (B1)

含义：评估区一年中每月降水量的平均值的总和 (mm)。

计算方法：

$$B1 = \sum \text{月降水量}$$

数据来源：水资源公报。

b) 再生水量 (B2)

含义：污废水经适当处理后，达到一定的水质指标，满足某种使用要求，可以回用于景观用水、农田用水等的水量 (t)。

计算方法：

$$B2 = \text{再生雨水} + \text{再生废水}$$

数据来源：国家/地区统计局网站、《中国/地区统计年鉴》。

c) 地表水量 (B3)

含义：陆地表面上动态水和静态水的总量，包括各种液态的和固态的水体，主要有河流、湖泊、沼泽、冰川、冰盖等 (t)。

计算方法：

$$B3 = \text{河流水} + \text{湖泊水} + \text{沼泽水} + \text{冰川水} + \text{冰盖水}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《水资源公报》。

d) 地下水量 (B4)

含义：地下水水面以下饱和含水层中的水量 (t)。

计算方法：

$$B4 = \text{渗入水} + \text{凝结水} + \text{初生水} + \text{埋藏水}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《水资源公报》。

**A.3 水生态分量 (C)**

a) 水源涵养能力 (C1)

含义：生态系统通过其特有的结构与水相互作用，对降水进行截留、渗透、蓄积，并通过蒸发实现对水流、水循环的调控的能力（mm）。

计算方法：

$$C1 = \min\left(1, \frac{249}{\text{流速系数}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{\text{土壤饱和导水率}}{300}\right) \times \text{年产水量}$$

$$\text{年产水量} = \left(1 - \frac{\text{各土地利用类型栅格单元上年平均蒸发量}}{\text{栅格单元}}\right) \times \text{栅格单元}$$

数据来源：国家/地区统计局网站、中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站（<https://www.resdc.cn/>）。

b) 水质净化能力（C2）

含义：陆域生态系统截留面源污染的能力，主要与土地利用类型相关（%）。

计算方法：

$$C2 = \frac{\sum \text{某个斑块的水质净化能力} \times \text{某个斑块的面积}}{\sum \text{某个斑块的面积}}$$

数据来源：国家/地区统计局网站、中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站（<https://www.resdc.cn/>）。

c) 河流蜿蜒度（C3）

含义：河段两 endpoint 之间河流弯曲弧线长度与直线长度的比值（%）。

计算方法：

$$C3 = \frac{\text{河段两 endpoint 之间河流弯曲弧线长度}}{\text{河段两 endpoint 之间河流直线长度}} \times 100$$

数据来源：中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站（<https://www.resdc.cn/>）。

d) 湿地面积占比（C4）

含义：地表过湿或经常积水，生长湿地生物的地区面积占区域总面积的比例（%）。

计算方法：

$$C4 = \frac{\text{土地利用类型为湿地的栅格数} \times \text{单位栅格面积}}{\text{所有土地利用类型的栅格总数}} \times 100$$

数据来源：中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站（<https://www.resdc.cn/>）。

#### A.4 点源排放量（D）

a) COD 点源排放量（D1）

含义：评估区内有固定排放点排放的以化学方法测量水样中需要被氧化的还原性物质的量的总量（t）。

计算方法：

$$D1 = \sum \text{某固定排放点 COD 排放量}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《国民经济社会发展公报》、国家/地区统计局网站。

b) 氨氮点源排放量 (D2)

含义：评估区内有固定排放点排放的以氨或铵离子形式存在的化合氮的总量 (t)。

计算方法：

$$D2 = \sum \text{某固定排放点氨氮排放量}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《国民经济社会发展公报》、国家/地区统计局网站。

c) TP 点源排放量 (D3)

含义：评估区内有固定排放点排放的各种形态的磷转变成正磷酸盐后测定的总量 (t)。

计算方法：

$$D3 = \sum \text{某固定排放点 TP 排放量}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《国民经济社会发展公报》、国家/地区统计局网站。

#### A.5 面源排放量 (E)

a) COD 面源排放量 (E1)

含义：评估区内有由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的以化学方法测量水样中需要被氧化的还原性物质的量的总量 (t)。

计算方法：

$$E1 = \sum \text{某非固定排放点 COD 排放量}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《国民经济社会发展公报》、国家/地区统计局网站。

b) 氨氮面源排放量 (E2)

含义：评估区内有由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的以氨或铵离子形式存在的化合氮的总量 (t)。

计算方法：

$$E2 = \sum \text{某非固定排放点氨氮排放量}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《国民经济社会发展公报》、国家/地区统计局网站。

c) TP 面源排放量 (E3)

含义：评估区内有由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地

表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的各种形态的磷转变成正磷酸盐后测定的总量 (t)。

计算方法:

$$E3 = \sum \text{某非固定排放点 TP 排放量}$$

数据来源:《中国/地区统计年鉴》、《国民经济社会发展公报》、国家/地区统计局网站。

#### A.6 水资源利用量 (F)

##### a) 生活用水量 (F1)

含义: 人类日常生活所需用的水量。包括城镇生活用水和农村生活用水。城镇生活用水由居民用水和公共用水(含服务业、餐饮业、货运邮电业及建筑业等用水)组成,农村生活用水除居民生活用水外还包括牲畜用水在内 (t)。

计算方法:

$$F1 = \text{城镇生活用水} + \text{农村生活用水}$$

数据来源:《中国/地区统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《水资源公报》。

##### b) 工业用水量 (F2)

含义: 工业生产过程中使用的生产用水及厂区内职工生活用水的总量。生产用水主要用途是: ①原料用水,直接作为原料或作为原料一部分而使用的水;②产品处理用水;③锅炉用水;④冷却用水等 (t)。

计算方法:

$$F2 = \text{原料用水} + \text{产品处理用水} + \text{锅炉用水} + \text{冷却用水}$$

数据来源:《中国/地区统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《水资源公报》。

##### c) 农业用水量 (F3)

含义: 用于灌溉和农村牲畜的用水总量 (t)。

计算方法:

$$F3 = \text{灌溉用水} + \text{农村牲畜用水}$$

数据来源:《中国/地区统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《水资源公报》。

#### A.7 上游来水压力 (G)

##### a) 上游来水 COD 量 (G1)

含义: 为本区域提供地上水和地下水供给的上一个区域所供给水源中以化学方法测量水样中需要被氧化的还原性物质的总量 (t)。

计算方法:

$$G1 = \text{上游来水中 COD 浓度} \times \text{上游来水量}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

b) 上游来水氨氮量 (G2)

含义：为本区域提供地上水和地下水供给的上一个区域所供给水源中由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的以氨或铵离子形式存在的化合氮的总量 (t)。

计算方法：

$$G2 = \text{上游来水中氨氮浓度} \times \text{上游来水量}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

c) 上游来水 TP 量 (G3)

含义：为本区域提供地上水和地下水供给的上一个区域所供给水源中由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的各种形态的磷转变成正磷酸盐后测定的总量 (t)。

计算方法：

$$G3 = \text{上游来水中 TP 浓度} \times \text{上游来水量}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

#### A.8 污染物排放强度与水资源利用强度 (H)

a) 人均生活用水量 (H1)

含义：评估区内平均每人每年耗水量 (m<sup>3</sup>/万人)。

计算方法：

$$H1 = \frac{\text{评估区内总年用水量}}{\text{评估区内总人口}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

b) 万元 GDP 水耗 (H2)

含义：评估区内平均每万元 GDP 耗水量 (m<sup>3</sup>/万元)。

计算方法：

$$H2 = \frac{\text{评估区内总年用水量}}{\text{评估区内以万元计的 GDP 总量}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

c) 万元 GDP 的 COD 排放量 (H3)

含义：评估区内平均每万元 GDP 所产生的以化学方法测量水样中需要被氧化的还原性物质的总量 (t/万元)。

计算方法：

$$H3 = \frac{\text{评估区内总 COD 排放量}}{\text{评估区内以万元计的 GDP 总量}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

d) 万元 GDP 的氨氮排放量 (H4)

含义：评估区内平均每万元 GDP 所产生的由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的以氨或铵离子形式存在的化合氮的总量 (t/万元)。

计算方法：

$$H4 = \frac{\text{评估区内总氨氮排放量}}{\text{评估区内以万元计的 GDP 总量}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

e) 万元 GDP 的 TP 排放量 (H5)

含义：评估区内平均每万元 GDP 所产生的由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的各种形态的磷转变成正磷酸盐后测定的总量 (t/万元)。

计算方法：

$$H5 = \frac{\text{评估区内 TP 排放量}}{\text{评估区内以万元计的 GDP 总量}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

A.9 区域发展能力 (I)

a) 城镇化率 (I1)

含义：城镇人口占总人口（包括农业与非农业）的比重（%）。

计算方法：

$$I1 = \frac{\text{评估区内城镇人口}}{\text{评估区内总人口（包括农业与非农业）}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

b) 人均 GDP (I2)

含义：一个国家核算期内（通常是一年）实现的国内生产总值与这个国家的常住人口（或户籍人口）的比值（万元/人）。

计算方法：

$$I2 = \frac{\text{评估区内国内生产总值}}{\text{评估区内常住人口（或户籍人口）}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

c) 第三产业占比 (I3)

含义：各类服务或商品 GDP 占地区总 GDP 的比值 (%)。

计算方法：

$$I3 = \frac{\text{评估区内各类服务或商品 GDP}}{\text{评估区内总 GDP}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、国家/地区统计局网站。

d) 环保投资占比 (I4)

含义：为解决现实的或潜在的环境问题,协调人类与环境的关系,保障经济社会的持续发展而支付的资金与地区国民生产总值的百分比 (%)。

计算方法：

$$I4 = \frac{\text{评估区内各类环保支出}}{\text{评估区内总 GDP}} \times 100$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《中国环境统计年报》、《国民经济和社会发展统计公报》和国家/地区统计局网站。

e) 污水处理率 (I5)

含义：经过处理的生活污水、工业废水量占污水排放总量的比重 (%)。

计算方法：

$$I5 = \frac{\text{经过处理的生活污水量} + \text{经过处理的工业废水量}}{\text{评估区内污水排放总量}}$$

数据来源：《中国/地区统计年鉴》、《中国环境统计年报》、《国民经济和社会发展统计公报》和国家/地区统计局网站。

**附录 B**  
**(规范性)**  
**常见权重确定方法**

经过建立流域/区域水环境承载力评估体系、数据标准化处理之后需要选定合适的指标评估方法，一般评估方法主要包括层次分析法、结构方程法、熵权法等。

### B.1 层次分析法

#### a) 建立层次结构

将决策的目标、考虑的因素和决策对象按照他们黄子健的相互关系分为最高层、中间层和最底层，画出层次结构图。

#### b) 构造判断矩阵

采用一直矩阵法确定各层次各因素之间得权重，即不把所有因素放在一起比较，而是两两进行比较，判断矩阵是表示本层所有因素针对上一层某一因素的相对重要性进行比较。

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{2n} \end{bmatrix}$$

式中，A 是同一层评估因子相对于上一层次的重要性，两两比较的判断矩阵

$a_{ij}$  是第  $i$  个评估因子相对于第  $j$  个评估因子的重要度，其值大于 0，则  $a_{ij}=1/a_{ji}, i, j=1, 2, \dots, n$ 。

#### c) 计算单排序权向量并做一致性检验

为了避免判断偏离一致性过大，需要进行一致性检验，使得  $CR < 0.1$ ，公式为：

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

式中，CI——一致性指标

$\lambda_{max}$ ——最大特征根

CR——一致性比率

RI——随机一致性指标 RI，n 与 RI 的关系如下表所示。

表 5 随机性一致性指标 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

当 CR 值小于 0.1 则认为 A 的不一致程度在容许范围之内，有满意的一致性，通过一致性检验，可用其归一化特征向量作为权向量  $W_i$ ，否则需要重新构造判断矩阵。



$$W_i = \frac{\sqrt[m]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdots a_{im}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt[m]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdots a_{im}}}$$

#### d) 计算总排序权向量并做一致性检验

计算最下层对最上层总排序的权向量并做一致性检验。

$$CR = \frac{a_1 CI_1 + a_2 CI_2 + \dots + a_m CI_m}{a_1 RI_1 + a_2 RI_2 + \dots + a_m RI_m}$$

当  $CR$  值小于 0.1 则符合一致性检验，否则需要重新考虑判断矩阵。

## B.2 结构方程法

结构方程模型（Structural Equation Model, 简称 SEM）是一种基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系的一种统计方法，是验证性因子模型与因果模型的结合。不仅如此，SEM 整合了路径分析与多元回归等方法，能够处理多个因变量，能够进行流域/区域水环境承载力影响因子的路径分析。

结构方程模型分为测量方程和结构方程，其中测量方程是观察侧变量与潜变量之间的关系，结构方程通过路径关系直观图描述潜变量之间的关系。结构方程模型结构分为测量模型和结构模型两个部分，分别是测量方程和结构方程。测量方程以因子分析的方式展示与描述潜变量与测量指标之间的关系；结构方程则通过一种路径关系图直观地描述潜变量之间的关系。在结构方程模型中，无法直接测量的变量用潜变量表征；可直接测量的变量用测量变量来表征。

### a) 测量模型

$$X = \Lambda_X \zeta + \delta$$

$$Y = \Lambda_Y \eta + \varepsilon$$

式中， $\zeta$ 、 $\eta$ ——分别表示外生潜变量矩阵和内生潜变量矩阵；

$X$ 、 $Y$ ——分别是  $\zeta$ 、 $\eta$  的测量变量矩阵；

$\Lambda_X$ 、 $\Lambda_Y$ ——分别表示  $X$ 、 $Y$  和  $\zeta$  之间的关系测量系数矩阵；

$\delta$ 、 $\varepsilon$ ——分别是方程残差矩阵和方程残差矩阵。其中， $\delta$  与  $\zeta$ 、 $\eta$  及  $\varepsilon$  不存在相关性， $\varepsilon$  与  $\eta$ 、 $\zeta$  及  $\delta$  也不存在相关性。

### b) 结构模型

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \xi$$

式中， $B$ ——内生潜变量间关系的内生潜变量系数矩阵；

$\Gamma$ ——外源潜变量对内生潜变量影响关系的外生潜变量系数矩阵。

在流域/区域水环境承载力模型假设基础上，运用测量模型和结构方程进行迭代计算，可以求解各影响因子对水环境承载力的影响路径以及贡献值。

### c) 权重确定

结构方程可以分析单项指标对总体的作用以及单项指标之间的相互关系，利用结构方程确定各个

变量之间的相关作用系数，进而确定各个指标的权重。因此可以通过构建水环境承载力大小以及水环境承载力状态结构方程，确定潜变量与观察变量之间的关系，确定各指标权重，最后确定水环境承载力大小与承载状态，如以下式所示。

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i$$

$$\omega_i = \frac{|\lambda_i|}{\sum_{i=1}^n |\lambda_i|}$$

式中：P——流域/区域水环境承载力评估结果；

$\omega_i$ ——第  $i$  个指标的权重；

$\lambda_i$ ——第  $i$  个指标的路径系数；

$x_i$ ——第  $i$  个指标标准化结果；

n——指标个数。

### B.3 熵权法

熵权法是一种根据各项指标观测值所提供的信息的大小，即信息熵来确定指标权重的客观赋权方法。指标的离散程度越大，该指标对综合评估的影响越大，则其权重也就越大。因此可以利用熵权法确定水环境承载力评估指标权重，然后确定流域/区域水环境承载力大小、状态以及开发利用潜势评估，如式所示。

$$P_i = \sum_{j=1}^m \omega_j x_{ij}$$

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)}$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \delta_{ij} \ln \delta_{ij}$$

$$\delta_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

式中：P<sub>j</sub>——第  $j$  个评估单元或第  $j$  年流域/区域水环境承载力评估结果；

$\omega_i$ ——第  $i$  个指标的权重；

$E_i$ ——第  $i$  个地区或年份的信息熵；

$\delta_{ij}$ ——指标的标准化后的占比；

$x_{ij}$ ——指标标准化结果；

n——指标个数。