

附件 4

# 地下水污染防治区划分 工作指南

(试行)

2014 年 10 月

# 目 次

第一章 总则.....	1
1.1 编制目的 .....	1
1.2 适用范围 .....	1
1.3 编制依据 .....	1
1.4 术语与定义 .....	2
1.5 指导原则 .....	3
1.6 组织编制单位 .....	3
第二章 工作内容与流程.....	4
2.1 工作内容 .....	4
2.2 工作流程 .....	4
第三章 地下水污染防治区划分方法.....	7
3.1 地下水污染源荷载评估 .....	7
3.2 地下水脆弱性评估 .....	14
3.3 地下水功能价值评估 .....	19
3.4 地下水污染现状评估 .....	23
3.5 地下水污染防治区划分 .....	24
第四章 地下水污染防治区划分技术报告及成果图表.....	29
4.1 报告编制大纲 .....	29
4.2 成果图 .....	29
4.3 成果表 .....	31
附录 A 地下水保护区、防控区及治理区评估结果分析表（参考式样） .....	32
附录 B 岩溶区域地下水脆弱性评估指标说明 .....	35
附录 C 土地利用现状分类及说明 .....	40
附录 D 权重和参数敏感度分析 .....	45

# 地下水污染防治区划分工作指南

(试行)

## 第一章 总 则

### 1.1 编制目的

为贯彻落实《全国地下水污染防治规划（2011-2020年）》，推进我国地下水污染防治工作，规范地下水污染防治区划分工作，根据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国水污染防治法》、《地下水质量标准》（GB/T 14848）及相关法律、法规、标准、文件，编制《地下水污染防治区划分工作指南（试行）》（以下简称“指南”）。

### 1.2 适用范围

1.2.1 本指南适用于区域尺度地下水污染防治区划分，评估区面积一般不小于0.4万km<sup>2</sup>，精度一般不小于1:25万。

1.2.2 本指南主要包括开展地下水污染防治区划分工作的主要工作内容、工作流程、技术方法、报告图集编制要求等方面。

### 1.3 编制依据

《中华人民共和国环境保护法》

《中华人民共和国水污染防治法》

《全国地下水污染防治规划（2011-2020年）》

GB/T 14175 水文地质术语

GB/T 14848 地下水质量标准

GB 3838 地表水环境质量标准  
GB 5749 生活饮用水卫生标准  
GB 5084 农田灌溉水质标准  
GB 8537 饮用天然矿泉水  
GB/T 8538 饮用天然矿泉水检验方法  
GB 11615 地热资源地质勘查规范  
GB 15218 地下水资源分类分级标准  
GB/T 21010 土地利用现状分类  
HJ/T 164 地下水环境监测技术规范  
HJ 610 环境影响评估技术导则地下水环境  
HJ/T 338 饮用水水源保护区划分技术规范

当上述标准和文件被修订时，使用其最新版本。

#### **1.4 术语与定义**

下列术语和定义适用于本指南。

**地下水污染源荷载：**指污染源对地下水产生影响程度的大小，取决于污染源的位置、类型以及污染物迁移转化规律等。

**地下水脆弱性：**由于自然条件变化或人类活动影响，地下水遭受破坏的趋向和可能性，它反映了地下水对自然和（或）人类活动影响的应付能力。

**地下水功能价值：**根据地下水埋藏条件、富水性、水质等，可为地下水开发利用服务的、具有现实或潜在经济意义的功能价值。

**地下水污染防治区划分：**基于地下水使用功能和污染现状特征，结合地下水污染源荷载、脆弱性和功能价值评估结果，对地

下水污染防治类型和等级提出分区。

### **1.5 指导原则**

(1) 简单实用原则：地下水污染防治区划分的方法原理简单且实用性强，结合地下水环境保护需求和经济社会发展规划，提出科学合理的污染防治分区建议；

(2) 系统完整原则：综合考虑水文地质单元及行政区划，划定防治分区的范围；

(3) 分区分级原则：根据地下水污染源荷载、脆弱性、功能价值以及污染状况，确定保护区、防控区及治理区等三类分区，根据区划防控值确定不同分区的地下水污染防治的对策建议；

(4) 动态调整原则：根据评估区地下水污染荷载、地下水污染状况等因素的重大变化情况，结合地下水环境管理需要，对地下水污染防治的区划结果进行动态调整。

### **1.6 组织编制单位**

本指南由环境保护部污染防治司组织编写，环境保护部环境规划院、北京师范大学、清华大学、中国地质科学院水文地质环境地质研究所、中国地质科学院岩溶地质研究所等单位起草编制。

## 第二章 工作内容和流程

### 2.1 工作内容

综合考虑地下水水文地质结构、脆弱性、污染状况、水资源禀赋和行政区划等因素，建立地下水污染防治区划分体系，划定地下水污染治理区、防控区及保护区。

将保护区划分为一级保护区、二级保护区及准保护区；防控区划分为优先防控区、重点防控区和一般防控区；治理区划分为优先治理区、重点治理区和一般治理区。

### 2.2 工作流程

地下水污染防治区划分工作的流程见图 1，具体内容如下：

（1）确定评估范围。以行政区或地下水系统为评估范围。

（2）收集资料。根据地下水污染源荷载、脆弱性、功能价值、污染现状评估的指标体系，收集相关数据资料，并开展必要的补充调查工作。

（3）地下水污染源荷载、脆弱性和功能价值的指标体系评估。根据资料分析结果，采用各指标体系的评估方法，开展地下水污染源荷载分区、地下水脆弱性分区、地下水功能价值分区等工作。

（4）地下水污染现状评估。根据地下水质量目标、标准限值、对照值（或背景值）开展地下水污染现状评估，评估指标主要是“三氮”（指硝酸盐氮、亚硝酸盐氮及氨氮）、重金属（第一类：铅、汞、铬、镉和类金属砷等；第二类：铊、锰、钡、镍、

锌、锡、铜、钼等)和有机类等污染指标,分别形成“三氮”、重金属和有机类等污染分布图。

(5) 地下水污染防治区划分。根据地下水使用功能和污染现状评估结果,划分保护区、治理区的一级区和二级区,以及防控区一级区;通过地下水污染源荷载、脆弱性、功能价值的图层叠加,划分防控区二级区;根据区划防控值,确定地下水污染防治的优先等级,提出针对性的地下水污染防治对策建议。

(6) 编制报告和成果图表。汇总和综合分析各阶段成果,编写地下水污染防治区划分技术报告和图表。

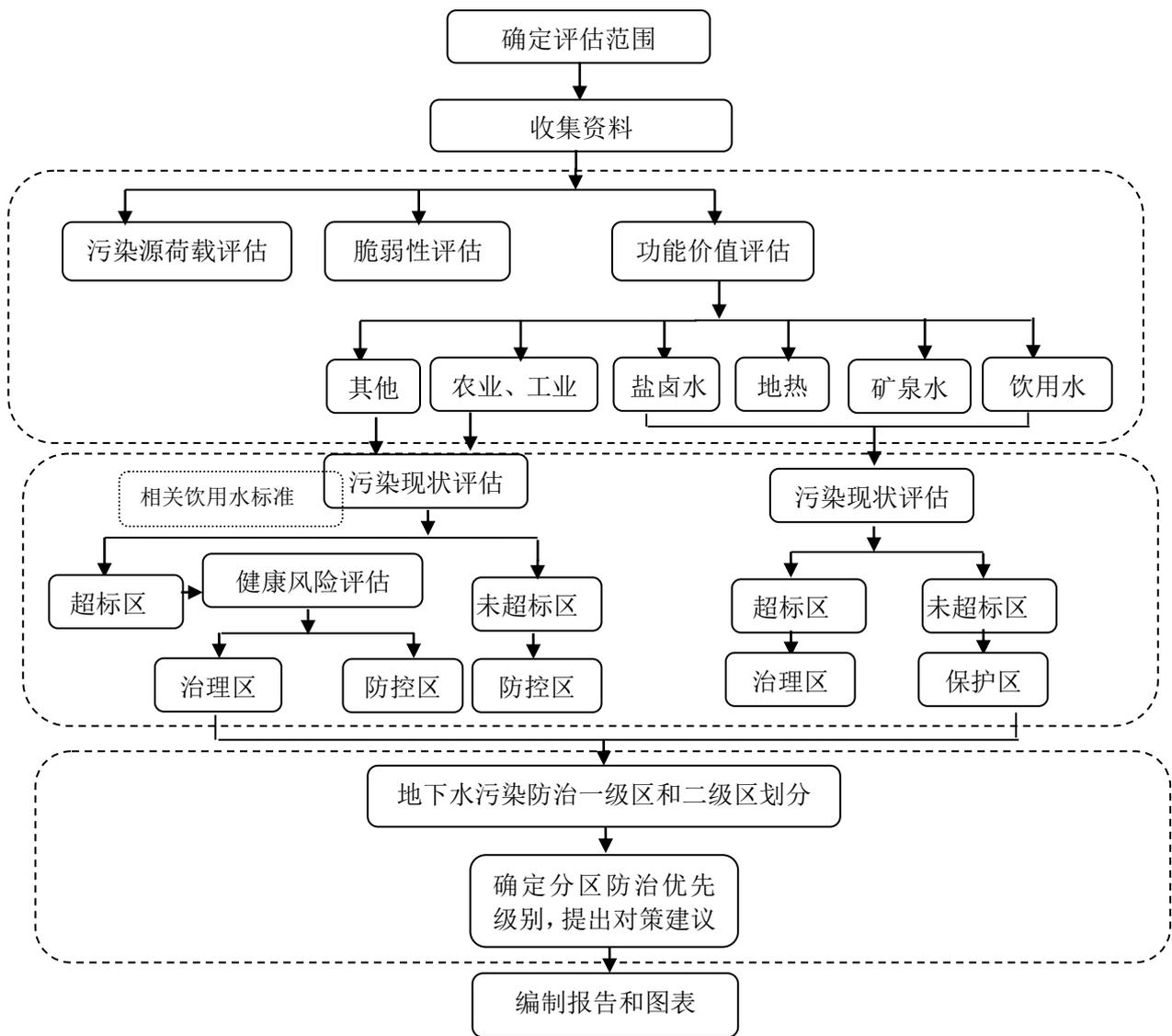


图 1 地下水污染防治区划分工作流程图

## 第三章 地下水污染防治区划分方法

### 3.1 地下水污染源荷载评估

#### 3.1.1 地下水重点污染源分类

地下水重点污染源主要包括工业污染源、矿山开采区、危险废物处置场、垃圾填埋场、加油站、农业污染源和高尔夫球场等。通过填写污染源清单信息（主要包括名称、所在地区、所属水文地质单元、地理坐标、重点污染源基础信息、监测井信息和水质监测状况、主要污染指标等信息），完成对不同污染源的调查。地表污水主要指水质为 V 类和劣于 V 类的地表水体，通过填写监测断面的水质监测状况、主要污染指标等信息完成调查。

资料来源为污染源普查、土壤污染状况调查、环境影响评估报告等，详见下表。

表 1 污染源范围、资料来源及归属部门

编号	污染源类型	范围	资料来源	资料归属部门
1	工业污染源	县级以上（含县级）工业园区、园区外重点工业污染企业、废弃工业污染场地	污染源普查、土壤污染状况调查	环保、发改
2	矿山开采区	大中型矿山	矿山调查表、污染源普查	国土、环保
3	危险废物处置场	全部	污染源普查、环评报告、土壤污染状况调查	环保、住建
4	垃圾填埋场	正规垃圾填埋场和 200 吨以上的非正规垃圾填埋场	污染源普查、环评报告、土壤污染状况调查	环保、住建
5	石油开采、储运和销售区	全部	加油站名单、环评报告	中石油、中石化、中海油、中石化、环保、工商、安监
6	农业污染源	农业集中种植区、再生水农用区、规模化养殖场	水利普查、污染源普查、土地利用调查	水利、环保、国土
7	高尔夫球场	全部	环评报告	发改、环保
8	地表污水	V 类和劣于 V 类的地表水体	水环境监测报告	水利、环保

### 3.1.2 单个污染源荷载风险评估指标体系

单个地下水污染源荷载风险计算公式如下：

$$P=T \times L \times Q \quad (3-1)$$

式中，P 表示污染源荷载风险指数，T 表示污染物毒性，L 表示污染源释放可能性，Q 表示可能释放污染物的量。

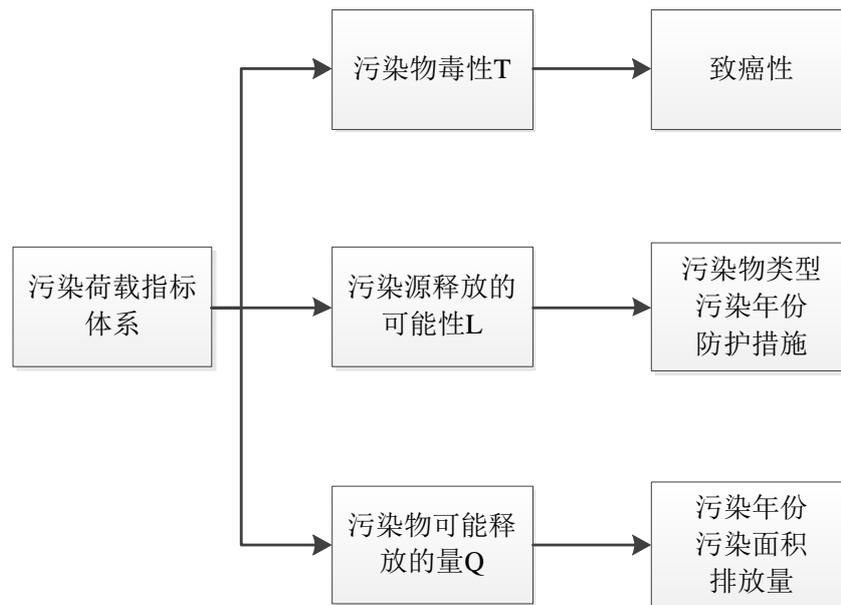


图 2 污染源荷载评估指标体系

#### 3.1.2.1 污染物毒性

污染物的毒性考虑污染物的物理化学性质、降解、迁移性等因素，与受体的致癌或非致癌风险直接相关，因此筛选和识别有毒、致癌风险较高的污染物是毒性指标评估的基础。在污染物指标明确的情况下，优先采用表 2 的毒性评分，存在多种污染物时一般取毒性最高的 T 作为计算值；若无法确定污染物指标时，采用表 3 进行计算。

缓冲区半径是指在污染源占地面积的基础上污染物可能迁移扩散的半径范围，主要与污染物类型有关。

表 2 主要污染物及其毒性评分表

(1) 致癌污染物	类型	毒性	
		得分	参考文献
1, 1, 2, 2-四氯乙烷	CD	2.8	IRIS
2, 4, 5-涕丙酸	C	2.1	IRIS
2, 4, 6-三氯酚	CD	1.8	IRIS
砷	C	3.7	HEAST
苯	CL	2	IRIS
双(2-乙基己基)邻苯二甲酸二酯	CD	1.5	IRIS
四氯化碳	CD	2.5	IRIS
氯仿	C	1.2	IRIS
二氯乙烷	CD	2.4	IRIS
二氯甲烷	CD	1.3	IRIS
六氯苯	CD	3.7	IRIS
六氯丁二烯	CD	2.3	IRIS
林丹	C	3.6	HEAST
三氯乙烯	CD	1.5	HEAST
三氟硝铵	C	1.3	IRIS
氯乙烯	CL	3.8	HEAST
亚硝酸盐	C	1	-
铬	C	2.7	IRIS
镉	C	1.7	HEAST
铅	C	1.3	MCL
(2) 非致癌污染物	类型	毒性	
		得分	参考文献
1, 2-二氯乙烯	ND	0.2	IRIS
2, 4-二氯苯氧基乙酸	N	0.5	IRIS
甲草胺	N	0.5	IRIS
滴灭威	N	1.3	IRIS
铈	N	1.9	IRIS
阿特拉津	N	0.8	IRIS
苯达松	N	1.1	IRIS
铍	N	0.8	IRIS
甲苯酚	N	0.2	IRIS
氰草津	N	1.2	IRIS
氰化物	N	2	IRIS
异狄氏剂	N	2.5	IRIS
乙基二丙基硫氨基甲酸酯	NL	0.1	IRIS
六氯环戊二烯	ND	0.6	IRIS
铁	N	0.5	MCL
汞	ND	2	HEAST
甲氧氯	N	2.3	IRIS
赛克津	N	0.1	IRIS

镍	N	1	IRIS
硝基苯	ND	1.8	IRIS
硒	N	1	HEAST
银	N	1	IRIS
四氯乙烯	ND	0.5	IRIS
钒	N	1	IRIS
MTBE	N	1.5	-

注：(1) C 为致癌物质，N 为非致癌物质；D 为比水重的非水相有机物，L 为比水轻的非水相有机物。

表 3 污染源毒性指标评分表

污染源	毒性类别	T 评分	缓冲区半径 (km) 推荐值
工业	石油加工、炼焦及核燃料加工业	2.5	1.5
	有色金属冶炼及压延加工业	3	1
	黑色金属冶炼及压延加工业	2	1
	化学原料及化学制品制造业	2.5	2
	纺织业	1	2
	皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业	1	2
	金属制品业	1.5	1
	其他行业	0.2	1
矿山	煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业	1.5	1.5
	黑色金属矿采选业	2	1
	有色金属矿采选业	3	1
	非金属矿采选业	1	1
危险废物处置场	工业危废、危险化学品为主	2	1
垃圾填埋场	生活垃圾、农业垃圾为主	1.5	2
加油站或石油开采、储运和销售区	总石油类、多环芳烃类	2.5	1.5
农业种植或污灌	化肥、农药、重金属为主	1.5	1.5
规模化养殖场	抗生素药物为主	1	1
高尔夫	农药	1.5	1.5
地表污水	工业、生活、农业废水排放等	1	1

注：矿山和工业分类参照国民经济行业分类与代码（GB/4754-2011）。

### 3.1.2.2 污染源释放可能性

污染源释放可能性与其防护措施有着密切关系。一般情况下，有防护措施且存在年限时间较短，污染源释放可能性较低；若由于时间久、防护措施维护不当等原因，污染源释放可能性会增加；若未采取任何防护措施，污染源释放可能性认定为 1，评

分标准见下表。

表 4 污染物释放可能性分级标准

污染源	释放可能性	L 评分
工业	建厂时间 2011 年之后	0.2
	建厂时间 1998~2011 年之间	0.6
	建厂时间 1998 年之前或无防护措施	1
矿山或石油开采区	≤5 年, 尾矿库或转运站有防渗	0.1
	>5 年, 尾矿库或转运站有防渗	0.3
	尾矿库或转运站无防渗	1
垃圾填埋场	≤5 年, 正规 I 级	0.1
	>5 年, 正规 I 级	0.2
	≤5 年, 正规 II 级	0.2
	>5 年, 正规 II 级	0.4
	≤5 年, 正规 III 级	0.4
	>5 年, 正规 III 级	0.5
	非正规、简易防护 (IV 级)	0.6
	非正规、无防护 (V 级)	1
危险废物处置场	正规	0.1
	无防护措施	1
石油储运和销售区	≤5 年、双层罐或防渗池	0.1
	(5, 15]年、双层罐或防渗池	0.2
	>15 年, 双层罐或防渗池	0.5
	≤5 年、单层罐且无防渗池	0.2
	(5,15]年, 单层罐且无防渗池	0.6
	>15 年, 单层罐且无防渗池	1
农业种植	水田	0.3
	旱地	0.7
规模化养殖场	有防护措施	0.3
	无防护措施	1
高尔夫	≤18 洞	0.1
	(18-36]洞	0.2
	>36 洞	0.5
地表污水	有防渗层	0.1
	无防渗层	1

### 3.1.2.3 可能释放污染物的量

可能释放污染物的量与污染源规模、污染物排放量等因素相关, 污染源规模越大, 污染物排放量越高, 则可能释放到地下水中污染物的量越大, 分级及评分标准见下表。

表 5 可能释放污染物的量分级及评分表

污染源	类型	Q 评分
工业 (废水排放量, 单位: $\times 10^3\text{t/a}$ )	$\leq 1$	1
	(1,5]	2
	(5,10]	4
	(10,50]	6
	(50,100]	8
	(100,500]	9
	(500,1000]	10
	$>1000$	12
矿山或石油开采区 (规模)	小型	3
	中型	6
	大型	9
垃圾填埋场 (填埋量, 单位 $\times 10^3\text{m}^3$ )	$\leq 1000$	4
	(1000,5000]	7
	$>5000$	9
危险废物处置场 (堆放量或填埋量, 单位 $\times 10^3\text{m}^3$ 单位)	$\leq 10$	4
	(10,50]	7
	$>50$	9
石油储运和销售区 (油罐容量为 $30\text{m}^3$ 的油罐数量, 个)	1	1
农业种植 (化肥使用量, 单位 $\text{kg/ha}$ )	$\leq 180$	1
	(180,225]	3
	(225-400]	5
	$>400$	7
规模化养殖场 (COD 排放量, 单位 $\text{t/a}$ )	$\leq 2$	1
	(2,10]	2
	(10,50]	4
	(50,100]	6
	(100,150]	8
	(150,200]	9
	$>200\text{t}$	10
高尔夫 (占地面积, $\text{hm}^2$ )	$\leq 50$	1
	(50,100]	2
	(100,200]	3

污染源	类型	Q 评分
	(200,300]	4
	>300	5
地表污水（径流量，m <sup>3</sup> /s）	≤100m <sup>3</sup> /s	1
	(100,1000]	3
	(1000,5000]	5
	(5000,10000]	7
	>10000	9

注： 1.矿山类型请参见“矿山生产建设规模分类一览表”（国土资发[2004]208号）。

2.规模化养殖场评分中，可根据已知多少（只）鸡或是（头）牛猪羊，按以下表格初步估算出 COD 排放量：

注表 1 禽类与 COD、氨氮换算表

畜禽类别（kg/个）	猪	奶牛	肉牛	蛋鸡	肉鸡
COD	36	1065	712	3.32	0.99
氨氮	1.8	2.85	2.52	0.1	0.02

出处《总量核查核算细则》。

### 3.1.2.4 单个污染源荷载风险等级划分

将单个污染源风险按公式（3-1）进行计算，计算结果 P 值由大到小排列，根据取值范围分为低、较低、中等、较高、高 5 个等级，在 GIS 环境下编辑得出每一类污染源的荷载风险等级分区图。

### 3.1.3 综合污染源荷载评估方法

依据各污染源计算结果迭加形成污染源荷载等级图。荷载综合指数计算公式：

$$PI = \sum W_i \times P_i \quad (3-2)$$

式中，PI 表示污染源荷载综合指数，W<sub>i</sub> 表示第 i 类污染源类型的权重（见下表），P<sub>i</sub> 表示第 i 类污染源的荷载。PI 值越大，表明污染源荷载越大。

表 6 荷载指标权重  $W_i$  推荐值表

评估因子	工业	矿山或石油开采区	垃圾填埋场	危险废物	加油站	农业	高尔夫	地表污水
权重	5	5	3	2	3	4	1	1

### 3.1.4 地下水污染源荷载评分结果及分区

对地下水污染源荷载综合指数 (PI) 进行等间距分级, 一般划分成五级, 按污染源荷载由强到弱依次为强、较强、中等、较弱、弱, 在 GIS 环境下编辑得出地下水污染源荷载评估综合分区图。

表 7 地下水污染源荷载评价标准

地下水污染源荷载综合指数值 DI	[0, 20]	(20, 40]	(40, 60]	(60, 80]	(80, 200]
地下水污染源荷载级别	低	较低	中等	较高	高

## 3.2 地下水脆弱性评估

地下水脆弱性评估主要针对我国浅层地下水的水文地质条件, 提出适合的孔隙潜水、岩溶水及裂隙水的地下水脆弱性评估方法, 得出在天然状态下地下水对污染所表现的本质敏感属性。地下水脆弱性评估与污染源或污染物的性质和类型无关, 取决于地下水所处的地质与水文地质条件, 是静态、不可变和人为不可控制的。因此地下水脆弱性评估首要是判别地下水类型, 然后识别不同类型地下水脆弱性的主控因素, 并收集相应的指标资料。

资料来源于水文地质调查、环境地质调查、气象、土壤质地类型、地下水监测孔钻孔报告等。

### 3.2.1 孔隙潜水脆弱性评估

孔隙潜水脆弱性评估建议采用 DRASTIC 模型。该模型在应用时假设以下条件成立：（1）污染物由地表经土壤层、包气带进入含水层；（2）污染物随水流入渗到地下水中；（3）污染物随水流动。

DRASTIC 模型由地下水位埋深（D）、净补给量（R）、含水层厚度（A）、土壤带介质（S）、地形（T）、包气带介质类型（I）和含水层渗透系数（C）等 7 个水文地质参数组成。模型中每个指标都分成几个区段，每个区段赋予评分。然后根据每个指标对脆弱性影响大小，参考附录 B 计算相应权重，最后通过加权求和，得到地下水脆弱性指数（DI）。

$$DI = D_w D_R + R_w R_R + A_w A_R + S_w S_R + T_w T_R + I_w I_R + C_w C_R \quad (3-3)$$

式中，DI 表示地下水脆弱性指数，字母 D、R、A、S、T、I、C 说明参见表 8，下标 R 表示指标值，下标 W 表示指标的权重。根据 DI 值，将脆弱性分为低脆弱性、较低脆弱性、中脆弱性、较高脆弱性和高脆弱性等类别。DI 值越高，地下水脆弱性越高，反之脆弱性越低。

孔隙潜水脆弱性各评估指标的数据来源、说明及建议权重见表 9，指标等级划分和赋值见表 10。

表 8 DRASTIC 模型各指标说明和权重建议值

指标	数据来源	说明	推荐权重
a) 地下水位埋深 (D)	水平年高水位期地下水水位统测资料	地下水位埋深指地表到潜水面的距离, 单位为 m, 精度至少满足 1:5 万。	5
b) 地下水垂向净补给量 (R)	降水量减去地表径流量和蒸散量或降水量乘以降水入渗系数	以大气降水为区域潜水补给最主要来源时, 可近似采用降水入渗补给量代替垂向净补给量; 在有其他主要的补给途径时, 要综合考虑各种补给来源对潜水的补给量。在农灌区需迭加灌溉回归量, 在地表水和地下水有水力联系的评估区需迭加地表水渗漏量。单位为 mm/a。	4
c) 含水层厚度 (A)	含水层顶底板等值线图或钻孔资料	含水层厚度可以从含水层顶、底板等值线图中计算得出, 或从钻孔资料分析得出, 单位为 m, 按 2-4 个钻孔/100km <sup>2</sup> 分析。	3
d) 土壤介质 (S)	钻孔柱状图或区域土壤分区图	土壤层为地表厚度 2m 或小于 2m 的风化层, 按 4-10 个钻孔/100km <sup>2</sup> 分析。	2
e) 地形坡度 (T)	DEM 坡度提取	利用 1:5 万或 1:1 万地形图的 DEM 提取后, 在 GIS 中可自动生成坡度值, 单位为%。	1
f) 包气带介质类型 (I)	钻孔柱状图或野外剖面	包气带是指潜水水位以上或承压含水层顶板以上土壤层以下的非饱和区或非连续饱和区的岩层, 根据钻孔资料获取包气带介质类型。按 4-10 个钻孔/100km <sup>2</sup> 分析计算, 以专家和有经验的水文地质工作者进行判断定名, 或者收集当地国土部门已完成的包气带岩性图。	5
g) 含水层渗透系数 (C)	经验值或野外抽水试验	含水层渗透系数从野外抽水试验获取, 或从钻孔资料分析得出, 按 2-4 个钻孔/100km <sup>2</sup> 分析, 单位为 m/d。	3

表 9 孔隙潜水脆弱性评估指标等级划分和赋值

指标	评分									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	>30	(25,30]	(20,25]	(15,20]	(10,15]	(8,10]	(6,8]	(4,6]	(2,4]	≤2
R	0	(0,51]	(51,71]	(71,92]	(92,117]	(117,147]	(147,178]	(178,216]	(216,235]	>235
A	>50	(45,50]	(40,45]	(35,40]	(30,35]	(25,30]	(20,25]	(15,20]	(10,15]	≤10
S	非涨缩和非凝聚性粘土(岩石)	粘质壤土(粘土)	粉质壤土	壤土	砂质壤土(砂土)	胀缩或凝聚性粘土	粉砂、细砂	砾石/中砂、粗砂	卵砾石	薄或缺失
T	>10	(9,10]	(8,9]	(7,8]	(6,7]	(5,6]	(4,5]	(3,4]	(2,3]	[0,2]
I	粘土	亚粘土	亚砂土	粉砂	粉细砂	细砂	中砂	粗砂	砂砾石	卵砾石
C	[0,4]	(4,12]	(12,20]	(20,30]	(30,35]	(35,40]	(40,60]	(60,80]	(80,100]	>100

根据上述各指标的评分和权重值，经计算可知地下水脆弱性综合指数取值范围为 20~200。DRASTIC 的地下水脆弱性级别与综合指数对应关系如下表所示：

表 10 孔隙水脆弱性评价标准

地下水脆弱性综合指数值 DI	[20, 70]	(70, 100]	(100, 120]	(120, 150]	(150, 200]
地下水脆弱性级别	低	较低	中等	较高	高

### 3.2.2 岩溶水脆弱性评估

岩溶地下水脆弱性评估可根据岩溶地区的特点和评估尺度建立相应指标体系。对比例尺大于 1:5 万的区域评价推荐使用 PLEIK 模型，对比例尺小于 1:5 万的大区域评价推荐使用 REKST 模型。不同类型的评估区可根据自然地理特征和水文地质特征对评估指标进行适当调整。

#### (1) PLEIK 模型

该模型共包括 5 个指标：P 为保护性盖层厚度，L 为土地利用类型，E 为表层岩溶带发育强度，I 为补给类型，K 为岩溶网络系统发育程度。具体评估过程请参考附录 B。

## (2) REKST 模型

该模型共包括 5 个指标：R 为岩石岩性，E 为表层岩溶（补给量 R 或径流模数 M），K 为岩溶化程度（或含水层 A），S 为土壤层，T 为地形。REKST 模型参数的权重是根据研究区实际情况来分配的，推荐权重为 2:5:3:4:1，其地下水脆弱性指标由下式确定：

$$REKST=2\times R+5\times K+3\times E+4\times S+1\times T \quad (3-4)$$

### 3.2.3 裂隙水脆弱性评估

裂隙水是指保存在坚硬岩石裂隙中的地下水，主要分布于基岩山区，平原区埋藏于松散沉积物之下的基岩中，地表很少出露。裂隙水具有强烈的非均匀性、各向异性和随机性。本指南推荐采用 DRASTIC 模型进行评估计算，评估方法及参数使用可参照 3.2.1（孔隙水脆弱性评估）所述进行计算。

### 3.2.4 地下水脆弱性评分结果及分区

综上，地下水脆弱性评估结果是对地下水脆弱性指数进行分级，一般划分成五级，按脆弱性由高到低依次为高、较高、中等、较低、低，在 GIS 环境下编辑得出地下水脆弱性评估分区图。对评估地区的地下水脆弱性进行定期跟踪评价。

### 3.3 地下水功能价值评估

#### 3.3.1 地下水使用功能分类

地下水的使用功能主要包括饮用水、饮用天然矿泉水、地热水、盐卤水、农业用水、工业用水等。本指南将饮用天然矿泉水、地热水、盐卤水等特殊矿产资源且具有较高的社会经济价值定义为“地下水特殊使用功能”；对于其他不确定使用功能的地下水定义为“其他类”。通过填报地下水使用功能清单信息（主要包括名称、所在地区、所属水文地质单元、地理坐标、使用功能基础信息、监测井信息、水质监测状况、主要水质指标等信息），完成对不同使用功能的调查，并在 GIS 环境下编制地下水使用功能分类图。

资料主要来源于水文地质调查、水利普查、环境影响评价报告、土地利用类型调查等，详见下表。

表 11 地下水使用功能清单情况表

编号	使用功能类型	填报范围	资料来源	资料归属部门
1	地下水型生活饮用水	地下水生活饮用水水源（已用、备用、应急、规划）保护区和补给径流区、农村供水工程	水文地质调查、水利普查、饮用水水源基础环境状况调查评估报告、饮用水水源保护区划分报告、农村供水水利工程报告	环保、水利
2	饮用天然矿泉水	全部	水文地质调查、矿泉水水源地（综合）评价报告、矿泉水水源地保护规划、矿泉水采矿权（转让权）评估报告	国土、环保
3	地热水	全部	水文地质调查、环境地质调查、地热资源勘察评估报告、环评报告	国土、环保
4	盐卤水	全部	水文地质调查、矿产资源调查、盐卤水资源开采（潜力）评估报告、环评报告	国土、环保

编号	使用功能类型	填报范围	资料来源	资料归属部门
5	农业用水	井灌区	水利普查、水文地质调查、土地利用类型调、农业灌溉区评估报告	水利、国土
6	工业用水	工业用水地下水源开采区	环评报告、取水许可	环保、住建

### 3.3.2 地下水功能价值评估指标体系

在明确地下水使用功能的基础上，地下水功能价值等级的计算综合考虑两个方面因素：地下水水质和地下水富水性。计算公式如下：

$$VI=V_Q \times V_w \quad (3-5)$$

式中，VI 为地下水功能价值综合指数，V<sub>Q</sub> 为地下水水质，V<sub>w</sub> 为地下水富水性。不同的使用功能其 V<sub>Q</sub> 和 V<sub>w</sub> 的评分标准不同。

#### 3.3.2.1 地下水质量现状评估

(1) 饮用水、农业和工业用水及其他不确定功能用水：根据收集的资料和调查的结果对地下水质量进行评估，评估方法采用《地下水质量标准》(GB/T 14848)、《生活饮用水卫生标准》(GB 5749) 中的单因子污染评价法和综合污染评价法，其评分标准见下表。

表 12 地下水质量现状评估分级标准

单因子污染评价	I	II	III	IV	V
评分	5	4	3	2	1
综合污染评价	优良	良好	较好	较差	极差
评分	5	4	3	2	1

地下水质量现状评估的最终评分按单因子污染评价法和综合污染评价法中分数最高分计算，即地下水质量现状评估分级=Max（单因子污染评价分级，综合污染评价分级）。对于未列入《地下水质量标准》(GB/T 14848)、《生活饮用水卫生标准》(GB 5749)的指标，需指明检出组分名称和检出值。

(2) 饮用天然矿泉水、地热水、盐卤水等特殊功能用水：  
凡符合相应功能水质标准的评分  $V_Q=5$ ，不符合的评分  $V_Q=1$ 。① 饮用天然矿泉水水质标准参见《饮用天然矿泉水》(GB 8537)和《饮用天然矿泉水检验方法》(GB/T8538)等标准；②地热水在本指南中主要针对含有某些特有的矿物质（化学）成分、可作为理疗热矿水开发利用的地热水进行评估。地热水水质标准（水温  $25^{\circ}\text{C}$ ）参见下表；③地下盐卤水是一种重要的盐化工业原料，具有很高的经济价值，一般情况下其水质标准为卤化矿化度大于  $50\text{g/L}$ 、盐水矿化度  $30\text{-}50\text{g/L}$ 。

表 13 地热水水质标准（水温  $25^{\circ}\text{C}$ ） 单位:mg/L

成分	有医疗价值浓度	矿水浓度	命名矿水浓度	矿水名称
二氧化碳	250	250	1000	碳酸水
总硫化氢	1	1	2	硫化氢水
氟	1	2	2	氟水
溴	5	5	25	溴水
碘	1	1	5	碘水
锶	10	10	10	锶水
铁	10	10	10	铁水
锂	1	1	5	锂水
钡	5	5	5	钡水
锰	1	1	—	—
偏硼酸	1.2	5	50	硼水

偏硅酸	25	25	50	硅水
偏硼酸	1	1	1	硼水
偏磷酸	5	5	—	—
镭 g/L	$10^{-11}$	$10^{-11}$	$>10^{-11}$	镭水
氡 Bq/L	37	47.14	129.5	氡水

注：1.本表根据以下资料综合制定：

- a.1981 年全国疗养学术会议修订的医疗矿泉水分类标准；
- b.原地矿部水文地质工程地质研究所编写的《地下水热水普查勘探方法》(地质出版社)；
- c.卫生部文[73]卫军管第 29 号《关于北京站热水井水质分析和疗效观察工作总结报告》。

2.本表引自国家标准 GB11615 《地热资源地质勘查规范》。

### 3.3.2.2 地下水富水性评估

地下水含水层的富水性表征地下水资源的埋藏条件和丰富程度，可用评估基准年的单井涌水量表征。

(1) 饮用水、农业和工业用水及其他功能用水的评分标准见下表。

表 14 地下水富水性评分标准

单位涌水量 (m <sup>3</sup> /d)	>5000	(3000,5000]	(1000,3000]	(100,1000]	≤100
评分	5	4	3	2	1

(2) 饮用天然矿泉水、地热水、盐卤水等特殊功能用水的富水性可根据相关调查报告或专家咨询进行评分，一般情况下特殊功能富水性高时评分  $V_w=5$ ，中时  $V_w=3$ ，少时  $V_w=1$ 。

### 3.3.3 地下水功能价值评分结果及分区

将地下水功能价值按公式 (3-5) 进行计算，计算结果 VI 值由大到小排列，根据使用功能及 VI 取值范围分为低、较低、中等、较高、高 5 个等级 (见下表)，在 GIS 环境下编辑得出不同使用功能的地下水功能价值等级分区图。

表 15 地下水使用功能指标评分推荐表

地下水功能价值指数 VI	高	较高	中等	较低	低
地下水型饮用水（城镇及农村）	≥20	[9,20)	[3,9)	若水质为 IV 类及以下，即 $V_Q \leq 2$ ，无需考虑富水性，VI=1	
特殊使用功能（饮用天然矿泉水、地热水、盐卤水）	25	15	5	若水质不满足相应标准，即 $V_Q = 1$ ，无需考虑富水性，VI=1	
农业、工业及其他	≥20	[15,20)	[10,15)	[5,10)	<5

### 3.4 地下水污染现状评估

地下水污染现状评估是指在不同的地下水使用功能区内评估人类活动产生的有毒有害物质的程度。主要采用“三氮”、重金属和有机类等有毒有害污染指标，在扣除背景值的前提下进行评估，直观反映人为影响的污染状况，根据评估指标超过标准的程度进行分区。

#### 3.4.1 对照法

根据收集的资料和调查的结果，参照《地下水质量标准》（GB/T 14848）、《生活饮用水卫生标准》（GB 5749）以及特殊使用功能水质相关标准（参见 3.3.2.1）分别进行“三氮”、重金属和有机类等污染指标进行指标对照评估。若“三氮”、重金属和有机类等污染指标①在评估区内未检出，则定义为未检出区；②若有检出但未超标，则定义为检出区；③若超过相关使用功能标准限值，则定义为超标区。①和②可合并为未超标区。

#### 3.4.2 地下水污染现状分区图

基于 GIS 平台，根据上述结果编制地下水污染现状分区图件，主要反映地下水中三氮、重金属和有机类污染物在评估区的分布情况。

## 3.5 地下水污染防治区划分

### 3.5.1 地下水污染防控值的计算

根据地下水污染源荷载 (PI)、脆弱性 (DI) 和功能价值 (VI) 的评分结果, 采用公式 (3-6) 计算得出不同区域的防控值。

$$R = PI \times DI \times VI \quad (3-6)$$

式中, R 表示评价区的防控值, PI 表示污染源荷载综合指数, DI 表示脆弱性综合指数, VI 表示地下水功能价值综合指数。结果一般采用等间距法划分为高、中、低三个等级, 在 GIS 环境下编辑成图。

### 3.5.2 地下水污染防治区划分结果和分区

#### 3.5.2.1 保护区

①对于明确地下水饮用水水源 (包括城镇及农村集中式)、特殊使用功能 (一般指饮用矿泉水、地热水和盐卤水等) 区域, 且地下水污染现状评估结果是未超标区, 则评定为相关使用功能的保护区;

②在已确定的地下水饮用水水源保护区范围内, 二级保护区区划分需按照《饮用水水源保护区划分技术规范》确定的一级保护区、二级保护区及准保护区进行分区和分级。

③在已确定的地下水特殊使用功能 (一般指饮用矿泉水、地热水和盐卤水等) 区域, 二级区划需叠加区划防控值的计算结果。根据防控值的高低确定优先等级, 一般划为二级保护区 (防控值高区) 和准保护区 (防控值中或低区)。

#### 3.5.2.2 治理区、防控区的划分

①对于明确地下水饮用水水源、特殊使用功能区域, 且地下

水污染现状评估结果为超标区，并确定为人为污染，则评定为相关使用功能的治理区；

②对于地下水饮用水水源和特殊使用功能的治理区范围，一般划分为两级，即优先治理区（已发生人为污染超标的地下水饮用水水源功能区）、重点治理区（已发生人为污染超标的特殊使用功能区）。

③对于农业用水、工业以及其他不明确地下水使用功能区域，若地下水污染现状评估结果为未超标区，则一般认定为防控区；若地下水污染现状评估结果为超标区，且确定为人为污染，则开展地下水健康风险评估（参见《地下水健康风险评估工作指南》），如健康风险评估结果未超过可接受健康风险水平，则一般认定为防控区，如健康风险评估结果超过可接受健康风险水平，则认定为治理区。

④在步骤③中划分的防控区范围内，二级区划需根据使用功能叠加区划防控值的计算结果划分。若为农业用水区，其划分为优先防控区（防控值高区）和重点防控区（防控值中或低区）；若为工业及其他不明确使用功能区域，则划分为重点防控区（防控值高区）和一般防控区（防控值中或低区）。

⑤在步骤③中划分的治理区范围内，需根据使用功能叠加污染严重程度进行划分。若为农业用水，严重超标区，则划分为重点治理区；非严重超标，则为一般治理区；若为工业及其他不明确使用功能区域，若非严重超标和严重超标区，则划分为一般治理区。

### 3.5.2.3 区划结果

3.5.2.1 节和 3.5.2.2 节初步确定了地下水污染防治区划分的结果，即根据地下水使用功能和污染现状得出一级区划结果，分为保护区、防控区、治理区。再根据不同的使用功能、区划防控值的高低又得到不同优先等级的二级区划结果，即一级保护区、二级保护区和准保护区；优先防控区、重点防控区和一般防控区；优先治理区、重点治理区和一般治理区，具体结果分析见下表。最后，根据评估区内行政区单元调整各一级区划和二级区划结果的边界，服务于管理需求。

有条件地区开展地下水污染防治区立体分层划分工作。需要注意的是，考虑到地层构造及沉积作用，我国很多地区（如华北平原）地层沉积以砂、砂砾石、粘性土层等相互交错出现，因此含水层存在单一层向多层转化分布的规律。所以建议在有条件的情况下分层进行区划，在单一结构含水层区和多层结构含水层区分别考虑相应的地下水脆弱性、地下水功能价值和地下水污染现状特点，获得立体式分层区划结果。

根据地下水功能价值和污染状况等因素重大变化，动态调整划分结果。如果有后续长期监测，发现了不同区域内地下水污染状况发生明显变化，则需要对划分范围进行修改，动态调整保护区、防控区和治理区的划分结果。

表 16 地下水污染防治区划结果分析详表

一级区划	二级区划	使用功能	污染现状	防控 R 值	对策建议（推荐）
保护区	一级保护区	饮用水一级保护区	未超标	（不需考虑）	依据国家和地方有关法律严格保护，禁止在饮用水水源一级保护区内新建、改建、扩建与供水设施和保护水源无关的建设项目；已建成的与供水设施和保护水源无关的建设项目，由县级以上人民政府责令拆除或者关闭。禁止在饮用水水源一级保护区内从事网箱养殖、旅游、游泳、垂钓或者其他可能污染饮用水水体的活动。一级保护区物理隔离设施覆盖率 100%。监测频次建议每月开展 1 次常规指标监测，每年开展 1 次水质全分析。
	二级保护区	饮用水二级保护区	未超标	（不需考虑）	禁止在饮用水水源二级保护区内新建、改建、扩建排放污染物的建设项目；已建成的排放污染物的建设项目，由县级以上人民政府责令拆除或者关闭。在饮用水水源二级保护区内从事网箱养殖、旅游等活动的，应当按照规定采取措施，防止污染饮用水水体。
		特殊使用功能	未超标	高	
	准保护区	饮用水准保护区	未超标	（不需考虑）	禁止在饮用水水源准保护区内新建、扩建对水体污染严重的建设项目；改建建设项目，不得增加排污量。禁止建设城市垃圾、粪便和易溶、有毒有害废物的堆放场所，因特殊需要建立转运站的必须经有关部门批准并采取防渗漏措施；化工原料、矿物油类及有毒有害矿产品的堆放场所必须有防雨、防渗措施；不得使用不符合《农田灌溉水质标准》（GB 5084）的污水进行灌溉。
		特殊使用功能	未超标	中或低	
	防控区	优先防控区	农业	未超标；超标但健康风险评估结果未超过可接受健康风险水平	高
重点防控区		农业	中、低		
		工业及其他	高		
一般防控区		工业及其他	中、低		

一级区划	二级区划	使用功能	污染现状	防控 R 值	对策建议（推荐）			
治理区	优先治理区	饮用水（城镇及农村）	超标	（不需考虑）	取缔违法建设项目和活动，优先开展地下水污染修复工作，以饮用水水源地和特殊使用功能区为中心分区块开展详细调查，制定修复目标，启动地下水污染修复工作。			
	重点治理区	特殊使用功能	超标		（不需考虑）	加大整治、搬迁和关闭地下水系统内威胁农业用水的重点污染源，严厉打击违法排污行为。污水灌区宜布置在防渗条件较好的厚土层区，并严格控制灌溉定额和采取防渗措施。对大量使用农药化肥的耕地，严格控制使用量。对废渣、矿渣及城市垃圾的堆放须经过调查研究，选择合理的地点。进行修复评估工作，以井灌供水区为中心分区块开展详细调查，制定修复目标，启动地下水污染修复工作。		
		农业	健康风险评估结果 <b>超过</b> 可接受健康风险水平且为 V 类					
	一般治理区	农业	健康风险评估结果 <b>超过</b> 可接受健康风险水平				（不需考虑）	强化重点水环境污染治理区的综合整治，整治区域内石化、电镀、印染、制革等重污染型产业，加大截污管网和污水集中处理设施建设力度；加大畜禽养殖和面源污染治理力度，划定畜禽禁养区。结合有关规划，及时关闭区域内不符合地下水污染区划和产业布局要求的污染企业；加快推进污水处理设施及配套管网建设。逐步开展地下水污染修复工作，根据土地功能和地下水污染途径，制定修复目标，筛选修复技术，推进典型污染企业的修复示范工程。
		工业及其他	健康风险评估结果 <b>超过</b> 可接受健康风险水平且为 V 类					

注：“特殊使用功能”指地下水具有饮用天然矿泉水、地热水、盐卤水等使用功能；“其他”指不明确地下水使用功能区域。

## 第四章 地下水污染防治区划分技术报告及成果图表

### 4.1 报告编制大纲

#### 1 前言

地下水污染防治区划分原则、任务目的、范围、精度和技术路线等。

#### 2 评估区概况

相关行政区划情况、土地利用类型、地表水系特征、水文地质条件、地下水环境特征、地下水污染源基本情况等。

#### 3 地下水污染源荷载评估

#### 4 地下水脆弱性评估

#### 5 地下水功能价值评估

#### 6 地下水污染现状评估

#### 7 地下水污染防治区划分

#### 8 地下水污染防治分区对策建议

### 4.2 成果图

成果图主要包括地下水污染源荷载、脆弱性、功能价值、污染现状评估过程中的单指标分级图和综合结果图等。基于 GIS 空间分析平台，各部分评估采用精度一般不小于 1:25 万，投影系统为北京 54 坐标，空间数据离散时建议采用克里金 (Kriging) 等方法进行插值。

表 17 地下水污染防治区划分所需成果图（GIS）需求表

评估内容	资料图	单指标分级图	评价结果图	数量	备注（“数量”计算不含资料图）
污染源荷载	地下水“双源”清单图、土地利用类型图	工业污染源、矿山开采区、危险废物、垃圾填埋场、加油站或石油（开采、储运和销售）区、农业集中种植或污灌区、规模化养殖场、高尔夫球场、地表污水等地下水污染源荷载分级图	地下水污染源荷载评估综合分区图	10	成果图的数量可随污染源数量的增加或减少而变化
脆弱性	综合水文地质平面图和剖面图, 钻孔柱状图、DEM 高程图等	<b>孔隙及裂隙水:</b> 地下水水位埋深、净补给量、含水层厚度、土壤类型、地形坡度、包气带介质岩性、含水层渗透系数分级图	地下水脆弱性评估分区图	8	成果图的数量可随影响指标的增加或减少而变化
		<b>岩溶水:</b> 保护性盖层厚度、土地利用类型、表层岩溶带发育强度、补给类型、岩溶网络系统发育程度分级图		6	
功能价值	地下水资源分布图、地下水功能区划图、地下水环境功能区划图等	地下水使用功能分布图、地下水质量分区图、地下水富水性分级图	地下水功能价值评估综合分区图	4	地下水质量分区图即采用地下水分类结果图即可
污染现状	地下水系统分区图	地下水三氮（硝酸盐、亚硝酸盐及氨氮）、重金属（铅、汞、铬、镉和类金属砷等）和有机类（多氯联苯、致癌物质、酚类、石油类等）等污染评估图	地下水污染现状综合评估分区图	≥4	成果图的数量根据污染指标的数量增加
区划评估	（采用前四项评估的结果图）	区划防控值分级图	地下水污染防治区划分成果图	≥2	成果图还可按地下水的使用功能分别编制区划图，如“XX 地区饮用水保护区和治理区分布图”等；也可按照防控类型编制“XX 地区保护区分布图”、“XX 地区防控区分布图”和“XX 地区治理区分布图”

### 4.3 成果表

本指南的成果表主要用来分析地下水污染源荷载、脆弱性、功能价值和污染现状评估结果的空间贡献情况，以及保护区、治理区和防控区的占地面积及空间贡献率（如表 18，也可采用饼状图进行分析）。详细区划成果分析表可参见表 17 和附录 A，可为地下水污染防治工程措施提供参考。

表 18 地下水污染防治区划分析简表

一级区划	二级区划	面积 (km <sup>2</sup> )	占评估区 百分比 (%)	工程措施
(区划评估区名称： 如 XX 省、区、市)	合计		100%	
保护区	一级保护区			
	二级保护区			
	准保护区			
防控区	优先防控区			
	重点防控区			
	一般防控区			
治理区	优先治理区			
	重点治理区			
	一般治理区			

附录 A 地下水保护区、防控区及治理区评估结果分析表（参考式样）

表 A.1 地下水保护区评估结果分析表

行政区	饮用水水源面积 (km <sup>2</sup> )			地下水污染源荷载 (km <sup>2</sup> , %)					地下水脆弱性 (km <sup>2</sup> , %)					地下水质量现状 (km <sup>2</sup> , %)			特殊使用功能		
																	矿泉水	地热水	盐卤水
(某省、 区、市) 保护区	(XX) 一级保护区	(XX) 二级保护区	(XX) 准保护区	高	较高	中等	较低	低	高	较高	中等	较低	低	I类水	II类水	III类水	在二级和准保护区的面积。		
	(面积)	(面积)	(面积)																
	(XX) 保护区小计																		
	(YY) 一级保护区	(YY) 二级保护区	(YY) 准保护区																
	(面积)																		
				(YY) 保护区小计															
	合计：(几个)保护区		(面积)														合计：(面积)		
			(占总评估区%)														(占总评估区%)		

说明：在 GIS 环境下计算不同分级分区的面积及百分数并进行填报。

表 A.2 地下水饮用水及特殊功能治理区评估结果分析表

行政区	饮用水水源面积 (km <sup>2</sup> )			地下水污染源荷载 (km <sup>2</sup> , %)					地下水脆弱性 (km <sup>2</sup> , %)					地下水质量现状 (km <sup>2</sup> , %)			特殊使用功能		
	(XX)一级保护区	(XX)二级保护区	(XX)准保护区	高	较高	中等	较低	低	高	较高	中等	较低	低	I类水	II类水	III类水	矿泉水	地热水	盐卤水
(某省、区、市) 优先治理区			(治理面积)														在二级和准保护区的面积。		
	(需治理面积)	(需治理面积)																	
		(XX) 治理区小计																	
	(YY)一级保护区	(YY)二级保护区	(YY)准保护区																
	(需治理面积)																		
		(YY) 治理区小计																	
合计: (几个) 治理区		(面积)														重点治理区合计:			
		(占总评估区%)														(占总评估区%)			

说明: 在 GIS 环境下计算不同分级分区的面积及百分数并进行填报。

表 A.3 地下水非饮用水或特殊使用功能区域的防控区及治理区评估结果分析表

行政区		地下水污染源荷载 (km <sup>2</sup> , %)					地下水脆弱性 (km <sup>2</sup> , %)					地下水污染现状 (km <sup>2</sup> , %)		
(某省、区、市)		高	较高	中等	较低	低	高	较高	中等	较低	低	未超标	超标未超健康风险水平	超健康风险水平且为 V 类水
农业	重点治理区													
	一般治理区													
	治理区合计													
	重点防控区													
	一般防控区													
	防控区合计													
工业及其他	一般治理区													
	治理区合计													
	重点防控区													
	一般防控区													
	防控区合计													

说明：数据来源于在 GIS 环境下计算不同分级分区的面积及百分数。

注：“其他”指不明确使用功能的地下水。

## 附录 B 岩溶区域地下水脆弱性评估指标说明

### 1 保护性盖层 (P)

保护性盖层是指地下水位以上的所有岩土层，既包括上覆非岩溶地层（如第四项松散沉积物等土层），也包括地下水位以上的岩溶化地层（如表层带上部）。在岩溶区，保护性盖层对污染物的拦截作用显著，岩溶含水层上部覆盖的松散层通常被认为是影响地下水脆弱性的最重要因素。本指标体系中的保护性盖层是指地下水位以上的非岩溶地层（如第四项松散沉积物等土层）；地下水位以上的岩溶化地层（如表层带上部）则在 E 因子（表层岩溶带发育强度）中进行评价。

保护性盖层厚度与水滞留时间密切相关，是评价地下水脆弱性的重要特征参数；盖层越薄，地下水脆弱性越高。根据碳酸盐岩上覆地层（土层）存在与否及其透水性可将土层分为两种情况，再按边界范围划分为四类（附表 A.1）。

土层性质，包括结构、构造、有机质和粘土矿物及饱水度和导水率等与物理、化学和生物有关的特殊要素，使土层对大部分污染物具有潜在的降解（或吸附）功能。为此，增加 CEC（阳离子交换容量）这一可以体现上覆岩土层脆弱性的指标，与覆盖层厚度属性共同构成评分矩阵（附表 B.2）。分值越低，代表地下水脆弱性越低，系统的防污性能越强。

**表 B.1 土层厚度属性分类**

保护性盖层分级	特性描述	
	A.土层直接覆盖于灰岩或高渗透率的碎石上	B.土层覆盖于低渗透率的底层上，如湖积物，粘土等
P <sub>1</sub>	土层厚度 0~20 cm	不超过 1m 的底层上土层厚度 0~20 cm
P <sub>2</sub>	土层厚度 20~100 cm	不超过 1m 的底层上土层厚度 20~100 cm
P <sub>3</sub>	土层厚度 100~150 cm	超过 1m 的底层上土层厚度 100 cm 左右
P <sub>4</sub>	土层厚度 >150 cm	低渗透率的底层上覆土层厚度超过 100 cm，或者超过 8m 的粘土或淤泥，或者非岩溶岩石地层

**表 B.2 保护性盖层评分矩阵**

	CEC 含量 (meq/100g)			
	<10	10~100	100~200	>200
P <sub>1</sub>	10	8	6	4
P <sub>2</sub>	9	7	5	3
P <sub>3</sub>	8	6	4	2
P <sub>4</sub>	7	5	3	1

### 2 土地利用类型 (L)

土地利用变化是人类活动的真实写照，快速的城市化不可避免地破坏植被和土壤结构；同时，路面硬化也都会使保护性盖层的脆弱性提高。土地类型与利用程度将人类活动所施加的外界影响植入岩溶水脆弱性评价中。

根据不同用途，土地类型可分为林地、草地、园地、耕地、村镇及工矿用地等五种，其属性分类详见附表 B.3。不同类型的土地可代表人类活动的强弱和土地利用程度的高低。

**表 B.3 土地利用程度属性分类**

土地利用类型及评分			特性描述
低	林地	1	以乔木为主、植被覆盖率大于 60% 的有林地（不包括幼林）
	草地	3	以灌丛、荒草为主的土地（包括幼林）

高 ↓	园地	6	用于种植果树的土地
	耕地	8	用于耕种的土地（包括菜地）
	裸地	9	几乎无植被覆盖
	村镇及工矿用地	10	包括居民区、工厂和矿山用地、公路等工程建设用地

### 3 表层岩溶带发育强度 (E)

表层岩溶带对岩溶水系统具有重要的调蓄功能,作为污染物从地表进入地下的主要途径之一,对地下水脆弱性影响巨大。

表层岩溶带的发育主要受岩性、岩石结构、构造、地貌、水动力条件、土层及植被覆盖情况等因素影响。表层岩溶带发育程度可以通过两个基本的尺度来度量:垂直相交溶蚀通道在特定尺度内的平均深度和频率(即个数);溶蚀通道包括岩溶节理、溶蚀裂缝、小溶沟、溶隙、溶管、小溶坑或竖井。表层岩溶带的发育分级可通过测量很方便地进行(附表 B.4)。

**表 B.4 表层岩溶带属性分级**

表层岩溶带类型及评分		特性描述
强烈发育的表层岩溶带	10	最小溶蚀间距(<0.25 m), 典型溶蚀深度>2 m
高度发育的表层岩溶带	8	较近的溶蚀间距(<0.5 m), 平均溶蚀深度 1~2 m
中等发育的表层岩溶带	6	中等溶蚀间距(<1m), 平均溶蚀深度 0.5~1.0 m
轻度发育的表层岩溶带	4	较大的溶蚀间距(>2m), 平均溶蚀深度小于 0.5m
不明显发育的表层岩溶带	2	在基岩上观察不到表层岩溶的溶蚀发育
发育不清楚的表层岩溶带	1	表层岩溶带不可见或被厚层沉积物所覆盖

当表层岩溶带定量测量难度较大时,还可以区域岩溶层组类型为基础进行分级(附表 B.5)。覆盖型岩溶区参照附表 B.5 对水位之上的表层岩溶带进行分级。

**表 B.5 表层岩溶带区域属性分级**

类	型	K	备注
均匀状纯碳酸盐岩类	灰岩连续型, 表层岩溶带强烈发育	10	中一厚层纯灰岩 无非碳酸盐岩夹层, 不纯碳酸盐岩夹层小于 10%
	灰岩夹白云岩型, 表层岩溶带高度发育	[8,9]	
	灰岩—白云岩交互(间隔)型, 表层岩溶带中等发育	[6,7]	
间层状碳酸盐岩类	断续状不纯碳酸盐岩型, 表层岩溶带轻度发育	[4,5]	非碳酸盐岩夹层小于 15%, 不纯碳酸盐岩厚度大于 50%
	非碳酸盐岩—不纯碳酸盐岩交互型, 表层岩溶带不明显发育	[2,3]	
不纯碳酸盐岩	表层岩溶带不发育	1	非碳酸盐岩厚度大于 50%, 不纯碳酸盐岩厚度小于 30%

### 4 补给类型 (I)

补给类型既包括岩溶含水层的补给类型,又包括补给强度。在覆盖型岩溶区,以面状入渗补给为主,同时还存在点状集中入渗补给(裸露区发育的落水洞等)。入渗补给量受降雨强度、土地利用类型及地形坡度的影响。补给类型属性分级详见附表 B.6。

**表 B.6 补给类型分级**

补给类型	属性描述	
集中补给	I <sub>1</sub>	落水洞或漏斗周围 500m 区域或伏流两侧各 500m 距离
	I <sub>2</sub>	落水洞或漏斗周围 500m~1000m 之间且向落水洞汇流坡度>10%的耕作区和坡度>25%的草地区和伏流两侧 500m~1000m 之间
分散补给	I <sub>3</sub>	落水洞或漏斗周围 500m~1000m 之间,且汇流坡度<10%的耕作区和坡度<25%的草地区
	I <sub>4</sub>	上述之外的汇水区域

当雨强小于下渗能力时,不产生地面径流。暴雨期,补给强度较大,初期会导致污染物大量而快速的迁移进入目标含水层,但后期则具有较大的稀释效应。结合补给类型,地面入渗补给强度对岩溶水系统脆弱性的影响详见附表 B.7。降雨强度可采用当地多年日最大降雨强度平均值。

**表 B.7 入渗补给强度分级与评分**

补给类型	雨强特性 (mm/d)		
	<9.9	10~24.9	>25
I <sub>1</sub>	4	[5, 9]	10
I <sub>2</sub>	3	[4, 7]	8
I <sub>3</sub>	2	[3, 5]	6
I <sub>4</sub>	1	[2, 3]	4

**5 岩溶网络发育情况 (K)**

含水层岩溶网络或洞穴系统是由直径或宽度超过 10 mm 的溶蚀空间组成的,也是自然条件下产生紊流的最小有效尺寸。空洞在岩溶网络系统中或多或少发育并相互连通,岩溶网络的发育及其结构对水流速度起重要作用并因此影响岩溶水系统脆弱性能。附表 B.8~10 均可进行岩溶网络发育评分,附表 B.8 的分类比较宏观,适于资料不足时判断评分;附表 B.9 采用地下水径流模数作为反映含水层岩溶网络发育的参数,可定量地评价含水层岩溶网络发育特征,建议采用。另外,还可根据岩溶含水层组类型划分结果简单地确定含水层岩溶网络发育程度(附表 B.10)。

**表 B.8 岩溶网络发育程度分类**

发育类型及评分		属性描述
强烈发育的岩溶网络	[8,10]	存在良好发育的岩溶网络(由分米到米级的管道组成,连通性极好,很少阻塞)
弱发育的岩溶网络	[4,7]	存在微弱发育的岩溶网络(小型管道,连通性较差或被充填,分米及的或更小尺寸的空洞)
混合和裂隙含水层	[1,3]	孔隙区出露泉水,无岩溶发育,仅存裂隙含水层

**表 B.9 岩溶网络属性的径流模数分类**

岩溶网络类型与评分		径流模数(L s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )
强烈发育的岩溶网络	[8,10]	<1
中等发育的岩溶网络	[6,7]	1~7
弱发育的岩溶网络	[4,5]	7~15
混合和裂隙含水层	[1,3]	>15

地下水径流模数，亦称“地下径流率”，是1平方公里含水层分布面积上地下水的径流量；表示一个地区以地下径流形式存在的地下水量的大小。年平均地下径流模数可用下式求算：

$$M=Q/(86.4F) \quad (\text{附 A-1})$$

式中，M表示地下水径流模数，L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>；F表示含水层分布面积，km<sup>2</sup>；Q表示地下水天然径流量，m<sup>3</sup>/d。

**表 B.10 岩溶网络属性的岩溶含水层组类型划分**

类型及评分			备注
均匀状纯碳酸盐岩类	灰岩连续型	10	无非碳酸盐岩夹层，不纯碳酸盐岩夹层小于10%
	灰岩夹白云岩型	9	
	灰岩—白云岩交互型	8	
	灰岩—白云岩间隔型	7	
间层状不纯碳酸盐岩类	断续状不纯碳酸盐岩型	[4, 6]	非碳酸盐岩夹层小于15%，不纯碳酸盐岩厚度大于50%
	非碳酸盐岩—不纯碳酸盐岩交互型	[1, 3]	非碳酸盐岩厚度大于30%，不纯碳酸盐岩厚度大于50%

## 6 评价与分级

为定量评价地下水脆弱性大小，需要对 PLEIK 属性进行数值计算，主要包括两个部分：权重赋值确定与指标等级划分(附表 B.10)。计算方法见公式：

$$DI=w_1 \times P_i + w_2 \times L_j + w_3 \times E_k + w_4 \times I_m + w_5 \times K_l \quad (\text{附 B-2})$$

其中，DI 值为脆弱性等级，DI 值越低，脆弱性越低（表 8）；w<sub>1</sub>、w<sub>2</sub>、w<sub>3</sub>、w<sub>4</sub>、w<sub>5</sub> 为权重赋值；P<sub>i</sub>、L<sub>j</sub>、E<sub>k</sub>、I<sub>m</sub>、K<sub>l</sub> 为等级分值。

各指标权重赋值可采用模糊综合矩阵法确定。方法如下：

将 5 项地下水脆弱性评价指标组成指标集：D=(d<sub>1</sub>,d<sub>2</sub>,...,d<sub>4</sub>,d<sub>5</sub>)=(保护性盖层，土地类型及利用程度，表层岩溶带，补给类型，岩溶网络发育程度)

首先研究指标集 D 对重要性的二元比较定性排序。

根据覆盖性岩溶区的水文地质条件，确定四个因子的相对重要性为：保护性盖层>土地类型及利用程度>表层岩溶带>补给类型>岩溶网络发育程度。由两两比较确定优先矩阵，再对优先矩阵进行一致矩阵转化并利用方根法进行归一化，得到最终的权重矩阵；再利用公式计算脆弱性等级：

$$\vec{w} = (w_1, w_2, \dots, w_5) \quad (\text{附 A-3})$$

以广西柳州市、河池市、南宁市等为例计算得到的权向量为：

$$w = (0.29, 0.24, 0.20, 0.16, 0.11) \quad (\text{附 A-4})$$

因此得到权重推荐值如附表 B.11，如下：

**表 B.11 权重推荐值**

参数	P	L	E	I	K
权重	0.29	0.24	0.20	0.16	0.11

根据上述各指标的评分和权重值，经计算可知岩溶地下水脆弱性综合指数取值范围为 1~10。PLEIK 的地下水脆弱性级别与综合指数对应关系如附表 B.12 所示：

**表 B.12 岩溶地下水脆弱性评估标准**

DI 值	[1,2]	(2,4]	(4,6]	(6,8]	(8,10]
脆弱性分级	低	较低	中等	较高	高

### 附录 C 土地利用现状分类及说明

土地利用现状分类参照《土地利用现状分类》国家标准（GB/T21010-2007）。

表 C.1 土地利用现状分类和编码

一级类		二级类		含义	三大类
类别编码	类别名称	类别编码	类别名称		
01	耕地	-	-	指种植农作物的土地，包括熟地、新开发、复垦、整理地，休闲地（轮歇地、轮作地）；以种植农作物（含蔬菜）为主，间有零星果树、桑树或其它树木的土地；平均每年能保证收获一季的已垦滩地和海涂。耕地中还包括南方宽度<1.0米、北方宽度<2.0米固定的沟、渠、路和地坎（埂）；临时种植药材、草皮、花卉、苗木等的耕地，以及其它临时改变用途的耕地	农用地
		011	水田	指用于种植水稻、莲藕等水生农作物的耕地。包括实行水生、旱生农作物轮种的耕地	
		012	水浇地	指有水源保证和灌溉设施，在一般年景能正常灌溉，种植旱生农作物的耕地。包括种植蔬菜等的非工厂化的大棚用地	
		013	旱地	指无灌溉设施，主要靠天然降水种植旱生农作物的耕地，包括没有灌溉设施，仅靠引洪淤灌的耕地	
02	园地	-	-	指种植以采集果、叶、根、茎、枝、汁等为主的集约经营的多年生木本和草本作物，覆盖度大于50%或每亩株数大于合理株数70%的土地。包括用于育苗的土地	
		021	果园	指种植果树的园地	
		022	茶园	指种植茶树的园地	
		023	其它园地	指种植桑树、橡胶、可可、咖啡、油棕、胡椒、药材等其它多年生作物的园地	
03	林地	-	-	指生长乔木、竹类、灌木的土地，及沿海生长红树林的土地。包括迹地，不包括居民点内部的绿化林木用地，以及铁路、公路、征地范围内的林木，以及河流、沟渠的护堤林	
		031	有林地	指树木郁闭度≥0.2的乔木林地，包括红树林地和竹林地	
		032	灌木林地	指灌木覆盖度≥40%的林地	
		033	其它林地	包括疏林地（指树木郁闭度≥0.1、<0.2的林地）、未成林地、迹地、苗圃等林地	
04	草地	-	-	指生长草本植物为主的土地	
		041	天然牧草地	指以天然草本植物为主，用于放牧或割草的草地	
		042	人工牧草地	指人工种牧草的草地	
		043	其它草地	指树林郁闭度<0.1，表层为土质，生长草本植物为主，不用于畜牧业的草地	未利用地

05	商服用地	-	-	指主要用于商业、服务业的土地
		051	批发零售用地	指主要用于商品批发、零售的用地。包括商场、商店、超市、各类批发（零售）市场，加油站等及其附属的小型仓库、车间、工场等的用地
		052	住宿餐饮用地	指主要用于提供住宿、餐饮服务的用地。包括宾馆、酒店、饭店、旅馆、招待所、度假村、餐厅、酒吧等
		053	商务金融用地	指企业、服务业等办公用地，以及经营性的办公场所用地。包括写字楼、商业性办公场所、金融活动场所和企业厂区外独立的办公场所等用地
		054	其它商服用地	指上述用地以外的其它商业、服务业用地。包括洗车场、洗染店、废旧物资回收站、维修网点、照相馆、理发美容店、洗浴场所等用地
06	工矿仓储用地	-	-	指主要用于工业生产、物资存放场所的土地
		061	工业用地	指工业生产及直接为工业生产服务的附属设施用地
		062	采矿用地	指采矿、采石、采砂（沙）场，盐田，砖瓦窑等地面生产用地及尾矿堆放地
		063	仓储用地	指用于物资储备、中转的场所用地
07	住宅用地	-	-	指主要用于人们生活居住的房基地及其附属设施的土地
		071	城镇住宅用地	指城镇用于居住的各类房屋用地及其附属设施用地。包括普通住宅、公寓、别墅等用地
		072	农村宅基地	指农村用于生活居住的宅基地
08	公共管理与公共服务用地	-	-	指用于机关团体、新闻出版、科教文卫、风景名胜、公共设施等的土地
		081	机关团体用地	指用于党政机关、社会团体、群众自治组织等的用地
		082	新闻出版用地	指用于广播电台、电视台、电影厂、报社、杂志社、通讯社、出版社等的用地
		083	科教用地	指用于各类教育，独立的科研、勘测、设计、技术推广、科普等的用地
		084	医卫慈善用地	指用于医疗保健、卫生防疫、急救康复、医检药检、福利救助等的用地
		085	文体娱乐用地	指用于各类文化、体育、娱乐及公共广场等的用地
		086	公共设施用地	指用于城乡基础设施的用地。包括给排水、供电、供热、供气、邮政、电信、消防、环卫、公用设施维修等用地
		087	公园与绿地	指城镇、村庄内部的公园、动物园、植物园、街心花园和用于休憩及美化环境的绿化用地
		088	风景名胜设施用地	指风景名胜（包括名胜古迹、旅游景点、革命遗址等）景点及管理机构的建筑用地。景区内的其它用地按现状归入相应地类
09	特殊用地	-	-	指用于军事设施、涉外、宗教、监教、殡葬等的土地
		091	军事设施用地	指直接用于军事目的的设施用地
		092	使领馆用地	指用于外国政府及国际组织驻华使领馆、办事处等的用地
		093	监教场所用地	指用于监狱、看守所、劳改场、劳教所、戒毒所等的建筑用地

建设用地

		094	宗教用地	指专门用于宗教活动的庙宇、寺院、道观、教堂等宗教自用地	
		095	殡葬用地	指陵园、墓地、殡葬场所用地。	
10	交通运输用地	-	-	指用于运输通行的地面线路、场站等的土地。包括民用机场、港口、码头、地面运输管道和各种道路用地	
		101	铁路用地	指用于铁道线路、轻轨、场站的用地。包括设计内的路堤、路堑、道沟、桥梁、林木等用地	
		102	公路用地	指用于国道、省道、县道和乡道的用地。包括设计内的路堤、路堑、道沟、桥梁、汽车停靠站、林木及直接为其服务的附属用地	
		103	街巷用地	指用于城镇、村庄内部公用道路（含立交桥）及行道树的用地。包括公共停车场，汽车客货运输站点及停车场等用地	
		104	农村道路	指公路用地以外的南方宽度 $\geq 1.0\text{m}$ 、北方宽度 $\geq 2.0\text{m}$ 的村间、田间道路（含机耕道）	农用地
		105	机场用地	指用于民用机场的用地	
		106	港口码头用地	指用于人工修建的客运、货运、捕捞及工作船舶停靠的场所及其附属建筑物的用地，不包括常水位以下部分	建设用地
		107	管道运输用地	指用于运输煤炭、石油、天然气等管道及其相应附属设施的地上部分用地	
11	水域及水利设施用地	-	-	指陆地水域，海涂，沟渠、水工建筑物等用地。不包括滞洪区和已垦滩涂中的耕地、园地、林地、居民点、道路等用地	
		111	河流水面	指天然形成或人工开挖河流常水位岸线之间的水面，不包括被堤坝拦截后形成的水库水面	未利用地
		112	湖泊水面	指天然形成的积水区常水位岸线所围成的水面	
		113	水库水面	指人工拦截汇集而成的总库容 $\geq 10$ 万 $\text{m}^3$ 的水库正常蓄水位岸线所围成的水面	建设用地
		114	坑塘水面	指人工开挖或天然形成的蓄水量 $< 10$ 万 $\text{m}^3$ 的坑塘常水位岸线所围成的水面	农用地
		115	沿海滩涂	指沿海大潮高潮位与低潮位之间的潮浸地带。包括海岛的沿海滩涂。不包括已利用的滩涂	建设用地
		116	内陆滩涂	指河流、湖泊常水位至洪水位间的滩地；时令湖、河洪水位以下的滩地；水库、坑塘的正常蓄水位与洪水位间的滩地。包括海岛的内陆滩地。不包括已利用的滩地	
		117	沟渠	指人工修建，南方宽度 $\geq 1.0\text{m}$ 、北方宽度 $\geq 2.0\text{m}$ 用于引、排、灌的渠道，包括渠槽、渠堤、取土坑、护堤林	农用地
		118	水工建筑用地	指人工修建的闸、坝、堤路林、水电厂房、扬水站等常水位岸线以上的建筑物用地	建设用地
		119	冰川及永久积雪	指表层被冰雪常年覆盖的土地	未利用地
12	其它	-	-	指上述地类以外的其它类型的土地	

土地	121	空闲地	指城镇、村庄、工矿内部尚未利用的土地	建设 用地
	122	设施农业用地	指直接用于经营性养殖的畜禽舍、工厂化作物栽培或水产养殖的生产设施用地及其相应附属用地，农村宅基地以外的晾晒场等农业设施用地	农用地
	123	田坎	主要指耕地中南方宽度 $\geq 1.0\text{m}$ 、北方宽度 $\geq 2.0\text{m}$ 的地坎	
	124	盐碱地	指表层盐碱聚集，生长天然耐盐植物的土地	未利 用地
	125	沼泽地	指经常积水或渍水，一般生长沼生、湿生植物的土地	
	126	沙地	指表层为沙覆盖、基本无植被的土地。不包括滩涂中的沙漠	
	127	裸地	指表层为土质，基本无植被覆盖的土地；或表层为岩石、石砾，其覆盖面积 $\geq 70\%$ 的土地	

表 C.2 城镇村和工矿用地

一级		二级		含义
编码	名称	编码	名称	
20	城镇村及工矿用地	-	-	指城乡居民点、独立居民点以及居民点以外的工矿、国防、名胜古迹等企事业单位用地，包括其内部交通、绿化用地
		201	城市	指城市居民点，以及与城市连片的和区政府、县级市政府所在地镇级辖区内的商服、住宅、工业、仓储、机关、学校等单位用地
		202	建制镇	指建制镇居民点，以及辖区内的商服、住宅、工业、仓储、学校等企事业单位用地
		203	村庄	指农村居民点，以及所属的商服、住宅、工矿、工业、仓储、学校等用地
		204	采矿用地	指采矿、采石、采砂（沙）场，盐田，砖瓦窑等地面生产用地及尾矿堆放地
		205	风景名胜及特殊用地	指城镇村用地以外用于军事设施、涉外、宗教、监教、殡葬等的土地，以及风景名胜（包括名胜古迹、旅游景点、革命遗址等）景点及管理机构的建筑用地

注：开展农村土地调查时，对《土地利用现状分类》中 05、06、07、08、09 一级类和 103、121 二级类按本表进行归并。

## 附录 D 权重和参数敏感度分析

### (1) 权重的确定

对于各阶段评估中出现的权重，一般可采用本指南的推荐权重。同时，也可根据指标选择情况对指标权重进行归一化处理，使指标权重和等于 20，以便进行评价结果的对比。

指标归一公式如下：

$$W_i = \frac{W_{i0}}{\sum_{i=0}^n W_{i0}} \times 20 \quad (\text{附 D-1})$$

式中， $W_i$  为指标归一化权重， $W_{i0}$  为指标原权重， $n$  为选取的指标个数。

### (2) 参数敏感度分析

对影响评估区地下水污染源荷载、脆弱性乃至区划评估结果的因素进行敏感度分析，讨论每个指标参与评价的必要性，分析判断对各项评估影响最高和最低的指标，也是对评估指标体系选取合理性的一个检验。敏感度高的指标对评估体系有大的影响作用，在室内资料收集与外业调查中适当加强对其的关注，增加采样密度，提高数据精度。敏感度低的指标对评估体系影响较低，可以适当放松其数据要求。

目前有两种敏感度分析方法，分别是地图移除参数分析法和单参数敏感分析法。

#### ① 地图移除参数分析

地图移除参数分析方法 (Map Removal Sensitivity Analysis) 是指通过从评估指标体系分析中移除一个或几个地图指标层确定评估的敏感度。公式为：

$$S = \left( \frac{\left| \frac{v}{N} - \frac{v'}{n} \right|}{\frac{v}{N}} \right) \times 100\% \quad (\text{附 D-2})$$

式中， $S$  表示敏感度； $v$  和  $v'$  表示未受干扰和受干扰的指标； $N$  和  $n$  表示计算  $v$  和  $v'$  的参数的数量。在本指南中，用所有指标计算得到的评估得分是非干扰结果，然而减少指标计算得到的评估得分是干扰结果。

#### ② 单参数敏感分析

单参数敏感分析 (Single-Parameter Sensitivity) 法用于评价每个参数对评估体系的影响。该方法计算了每个参数的有效权重。

有效权重是每个指标评分和相应权重乘积占用评估结果指数求得的百分比，计算公式如下：

$$W = \left( \frac{P_r P_w}{v} \right) \times 100\% \quad (\text{附 D-3})$$

式中， $W$  表示每个参数的有效权重； $P_r$  和  $P_w$  表示每个参数的等级和权重； $v$  表示评估结果指数值。