



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

城市生态风险评估技术指南

Technical guideline for urban ecological risk assessment

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

征求意见稿

(本稿完成日期：2022年7月)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前 言.....	II
引 言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	2
4 评价流程.....	3
5 指标体系.....	4
6 评价方法.....	6

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。

本文件由全国环境管理标准化技术委员会（SAC/TC 207）提出并归口。

本文件起草单位：□□□□、□□□□、□□□□、□□□□

本文件主要起草人：□□□、□□□、□□□、□□□、□□□、□□□、□□□

引 言

城市所面临的风险不仅仅来源于自然灾害或者有毒污染物泄漏等突发性环境事件。在快速、大规模城市化背景下，人口增长、产业发展和建设用地扩张等人为风险源对城市生态系统造成的干扰正在不断加剧，逐步导致我国大多数城市面临生态系统结构退化、生态系统稳定性下降，最终反映于城市生态系统服务质量的下降或丧失。如何在推进新型城镇化的过程中，防范城市化建设等人类社会经济活动产生的生态风险，保持并提升城市生态系统服务日益受到党和国家的重视。面向城市生态风险研究的重要性、迫切性和复杂性，制定《城市生态风险评价技术指南》，阐明与城市生态风险相关的术语及定义，规范评价流程，构建指标体系，明确评价方法。旨在为各省、市、区在生态保护规划的编制时提供城市生态风险评价和防控等技术流程与重要依据，为我国新型城镇化背景下的生态文明建设和生态环境管理提供技术支撑。

城市生态风险评价技术指南

1 范围

本文件规定了城市生态风险评价技术指南的术语、评价流程、指标体系与评价方法等内容。

本文件适用于评价城市在城市化建设开发中由人类活动引起的生态风险。

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。

GB 3095 环境空气质量标准

GB 3096 声环境质量标准

GB 3838 地表水环境质量标准

GB 5085.7 危险废物鉴别标准 通则

GB 8978 污水综合排放标准

GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准

GB/T 14848 地下水质量标准

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB 16297 大气污染物综合排放标准

GB 18484 危险废物焚烧污染控制标准

GB 18485 生活垃圾焚烧污染控制标准

GB 18598 危险废物填埋污染控制标准

GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB 37822 挥发性有机物无组织排放控制标准

HJ 564 生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范（试行）

生态保护红线划定指南（环办生态〔2017〕48号）

区域生态质量评价办法（试行）（环监测〔2021〕99号）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

风险 risk

不确定性的影响。

注1：影响指对预期的偏离——正面的或负面的。

注2：不确定性是一种状态，是指对某一事件、其后果或发生的可能性缺乏（包括部分缺乏）信息、理解或知识。

注3：通常用潜在“事件”（见 GB/T 23694—2013 中的 4.5.1.3）和“后果”（见 GB/T 23694—2013 中的 4.6.2.3），或两者的结合来描述风险的特性。

注4：风险通常以事件后果（包括周围环境的变化）与相关的事件发生的“可能性”（见 GB/T 23694—2013 中的 4.6.2.1）的组合来表示。

[来源：GB/T 24001—2016, 3.2.10]

3.2

生态风险 ecological risk

具有不确定性的事件（如环境污染累积、自然资源消耗或生态空间占用）对生态系统及其组分可能产生的损害。

3.3

胁迫 stressor

由风险源产生的可造成负面生态效应的物理、化学或生物实体及过程。

3.4

胁迫因子 stressor factor

对胁迫的定量描述，是可直接量化的胁迫。

3.5

风险受体 risk receptor

风险的承担者，即暴露于胁迫下的个体、种群、群落或生态系统。

3.6

评价终点 assessment endpoint

能有效表达生态环境价值且暴露于胁迫下的生态实体的某种属性。

[来源：SL/Z 467，3.7，有修改]

3.7

评价终点指标 assessment endpoint indicator

表征评价终点状态的可度量指标。

3.8

生态风险评价（单胁迫） ecological risk assessment (single stressor)

评价风险源所释放的单个胁迫对风险受体的评价终点可能发生不良生态效应的过程。

3.9

暴露-响应关系 exposure-responses relationship

胁迫的暴露强度和频率与评价终点之间的定量关系。

4 评价流程

本标准制定了城市生态风险评价流程，见图1。

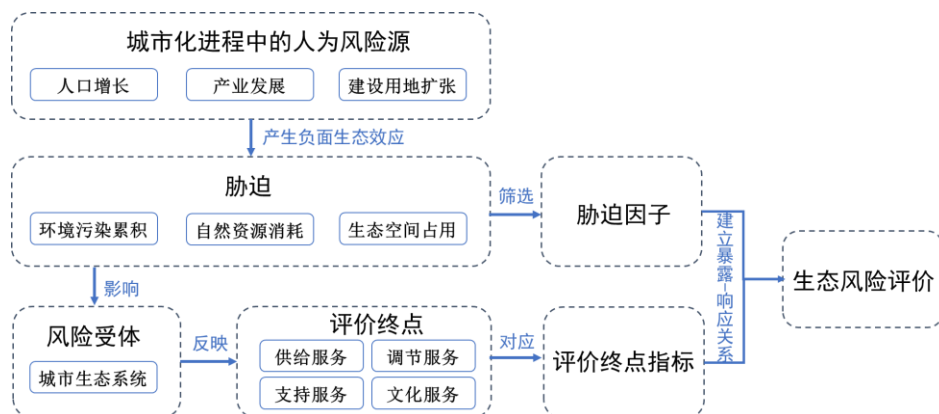


图1 城市生态风险评价流程

5 指标体系

5.1 总则

本标准提出的指标体系罗列了具有代表性的胁迫以及可量化的胁迫因子，列举了对应的评价终点以及可量化的评价终点指标。

本标准根据胁迫存在的形式及特性，将胁迫分为环境污染累积类、自然资源破坏类、生态空间占用类三个类别。环境污染累积类的胁迫包括大气污染、水污染、土壤污染、固体废物、噪声污染、光污染以及热污染。自然资源消耗类的胁迫包括水资源消耗、生物资源消耗以及生物多样性损失。生态空间占用类的胁迫包括重要生态功能区占用、生态安全网络破坏以及围填海（湖）。

针对特定城市进行指标体系搭建的过程中，宜梳理在城市化过程中面临的所有胁迫，尽可能保障所列胁迫的准确性和完整性。应根据自然资源禀赋、面临的生境情况、城市发展定位等城市特征因素，筛选重要的胁迫因子。此外，用户可根据评价目的，单独使用或并用三种胁迫类型的指标体系。

5.2 三种胁迫类型的指标体系构建

环境污染累积类胁迫的生态风险评价指标体系的构建见表1。

表 1 环境污染累积类胁迫的生态风险评价指标体系

胁迫	胁迫因子	评价终点指标	评价终点
大气污染	环境空气污染物基本指标	大气环境污染指数	维护空气质量 调节气候 控制侵蚀
	区域特征空气污染物指标		
水污染	地表水环境质量标准基本指标	水环境污染指数	净化水质和处理废弃物 养分循环
	地下水质量标准常规指标		
	区域特征水污染物指标		
土壤污染	农用地土壤污染风险的基本指标	土壤环境污染指数	土壤形成 提供栖息地 供给食物 初级生产
	建设用地土壤污染风险的基本指标		
	区域特征土壤污染物指标		

续表 1 环境污染累积类胁迫的生态风险评价指标体系

固体废物	暴露于生活垃圾渗滤液和生活垃圾填埋场周边地下水中的污染物指标	生活垃圾危害指数	土壤形成 净化水质和处理废弃物 养分循环
	工业固体废物渗滤液及其处理后排放水中的污染物指标	工业固体废物污染指数	
	工业固体废物无组织气体中的污染物指标		
	危险废物在填埋和焚烧的过程中产生的污染物指标	危险废物污染指数	
噪声污染	噪声指标	声环境污染指数	调节噪声
光污染	城市夜景照明辐照度指标	动植物生活生长 干扰度指数	调节疾病、病虫害 提供栖息地
热污染	城市不透水面像元的比辐射率指数	地表热环境指数	调节气候

自然资源消耗类胁迫的生态风险评价指标体系的构建见表2。

表 2 自然资源消耗类胁迫的生态风险评价指标体系

胁迫	胁迫因子	评价终点指标	评价终点
水资源消耗	工业生产用水量	生产生活供水保障率 指数	供给淡水
	农业灌溉用水量		
	居民生活用水量		
	生态需水量		
生物资源消耗	林业资源消耗量	农林牧渔资源保障率 指数	供给木材和纤维 供给燃料 供给食物
	农业资源消耗量		
	牧业资源消耗量		
	渔业资源消耗量		
生物多样性损失	重点保护生物指数	生物多样性损失指数	供给遗传资源 提供栖息地 消遣与生态旅游
	指示生物类群生命力指数		
	原生功能群种占比指数		

生态空间占用类胁迫的生态风险评价指标体系的构建见表3。

表3 生态空间占用类胁迫的生态风险评价指标体系

胁迫	胁迫因子	评价终点指标	评价终点
重要生态功能区占用	土地利用变化后的生态系统水源涵养服务能力指数	水源涵养功能重要性丧失指数	提供栖息地 控制侵蚀
	土地利用变化后的生态系统水土保持服务能力指数	水土保持功能重要性丧失指数	消遣与生态旅游 调节水分
	土地利用变化后的生态系统防风固沙服务能力指数	防风固沙功能重要性丧失指数	净化水质和处理废弃物
	土地利用变化后的生态系统生物多样性服务能力指数	生物多样性功能重要性丧失指数	控制自然灾害 初级生产
	土地利用变化后的生态系统水土流失敏感性指数	水土流失敏感性增强指数	控制侵蚀 消遣与生态旅游
	土地利用变化后的生态系统土壤沙化敏感性指数	土壤沙化敏感性增强指数	净化水质和处理废弃物
	土地利用变化后的生态系统石漠化敏感性指数	石漠化敏感性增强指数	控制自然灾害
生态安全网络破坏	路网铺装面积（干线公路车道、铁路）	生境质量干扰指数	提供栖息地 消遣与生态旅游
	重要斑块面积与相间距离	重要生态空间连通度指数	美学价值
围填海（湖）	填海造地面积、围海面积、构筑物用海面积	海（水）域开发强度指数	提供栖息地 消遣与生态旅游

6 评价方法

6.1 总则

在生态风险评价时，宜考虑数据可获得性、权衡胁迫因子的全面性与代表性、确保信息来源的可靠性；城市生态系统面临的实际情况；以及用户的需求。

单个评价结果可作为定量评估城市生态系统受到某一种胁迫时造成风险的依据；组合多个评价结果可作为综合评估城市生态系统受到多种胁迫时造成风险的依据。评价结果可进行同一城市在时间序列上的风险比较，反映生态风险的变化趋势；可进行不同城市间在同一时

期的风险比较，对比不同城市的生态风险程度。

6.2 环境污染累积类胁迫对应的评价终点指标的生态风险评价方法

6.2.1 大气环境污染指数

大气环境污染指数反映城市中大气环境的生态风险程度，对单种环境空气污染物的风险评价可按公式（1）计算；对多种环境空气污染物的综合评价可采用内梅罗指数法，具体评价方法按公式（2）计算。大气环境综合污染指数越大，反映城市生态系统受大气污染的胁迫程度越高，生态风险越大。环境空气污染物的选择应依据 GB 3095，宜采用环境空气污染物基本项目作为衡量大气环境污染的胁迫因子，包括二氧化硫（SO₂）、二氧化氮（NO₂）、一氧化碳（CO）、臭氧（O₃）、颗粒物粒径小于等于 10μm（PM₁₀）、颗粒物粒径小于等于 2.5μm（PM_{2.5}）。环境空气污染物的其他项目可作为区域特征指标，由地方生态环境主管部门根据区域空气污染特点和生态环境管理需求进行选择，并酌情纳入风险评估指标体系。

$$API_i = \frac{APM_i}{AQS_i} \quad (1)$$

$$API_{综} = \sqrt{\frac{API_{iave}^2 + API_{imax}^2}{2}} \quad (2)$$

式中： API_i — 大气环境中第 i 种污染物的污染指数，无量纲；

APM_i — 大气环境中第 i 种污染物的实测值，mg/m³；

AQS_i — 第 i 种污染物的环境空气质量浓度标准，mg/m³，宜参考 GB 3095 中的对应项；

API_{iave} — 大气环境中各单项污染指数中的平均值，无量纲；

API_{imax} — 大气环境中各单项污染指数中的最大值，无量纲；

$API_{综}$ — 大气环境污染指数，无量纲。

6.2.2 水环境污染指数

水环境污染指数反映城市中的地表水/地下水的生态风险程度，对单种水环境污染物的风险评价可按公式（3）计算；对多种水环境污染物的综合评价可采用内梅罗指数法，具体评价方法按公式（4）计算。水环境污染指数越大，反映城市生态系统受水污染的胁迫程度越高，生态风险越大。地表水环境污染物的选择应依据 GB 3838，宜采用地表水环境质量标准基本项目或集中式生活饮用水地表水源地特定项目作为衡量地表水环境污染的胁迫因子。

地下水环境污染物的选择应依据 GB/T 14848，以地下水质量常规指标为主、地下水质量的非常规指标为辅作为衡量地下水环境污染的胁迫因子，包括一般化学指标、微生物指标、毒理学指标和放射性指标等。水环境污染物中的其他项目可作为区域特征指标，由地方生态环境主管部门根据区域水污染特点和生态环境管理需求进行选择，并酌情纳入风险评估指标体系。

$$WPI_i = \frac{WPM_i}{WQS_i} \quad (3)$$

$$WPI_{\text{综}} = \sqrt{\frac{WPI_{i\text{ave}}^2 + WPI_{i\text{max}}^2}{2}} \quad (4)$$

式中： WPI_i — 地表水/地下水中第 i 种污染物的污染指数，无量纲；

WPM_i — 地表水/地下水中第 i 种污染物的实测值，mg/L；

WQS_i — 地表水/地下水中第 i 种污染物的水环境质量浓度标准，mg/L，地表水和地下水环境污染物浓度的标准限值分别参考 GB 3838 和 GB/T 14848 中的对应项；

$WPI_{i\text{ave}}$ — 地表水/地下水中各单项污染指数中的平均值，无量纲；

$WPI_{i\text{max}}$ — 地表水/地下水中各单项污染指数中的最大值，无量纲；

$WPI_{\text{综}}$ — 水环境污染指数，无量纲。

6.2.3 土壤环境污染指数

土壤环境污染指数反映城市中土壤的生态风险程度。对单种土壤污染物的风险评价可按公式（5）计算；对多种土壤污染物的综合评价可采用内梅罗污染指数法，具体评价方法可按公式（6）计算。土壤环境污染指数越大，反映城市生态系统受土壤污染的胁迫程度越高，生态风险越大。建设用地土壤污染物的选择应依据 GB 36600，宜采用七项重金属指标作为衡量建设用地土壤污染物的胁迫因子，包括镉（Cd）、汞（Hg）、砷（As）、铅（Pb）、铬（Cr）、铜（Cu）、镍（Ni）；基本项目中的其他项目如挥发性有机物和半挥发性有机物等可作为区域特征指标，由地方生态环境主管部门根据区域土壤污染特点和生态环境管理需求进行选择，并酌情纳入风险评估指标体系。农用地土壤污染物的选择应依据 GB 15618，宜采用农用地土壤污染风险的基本项目作为衡量农用地土壤污染的胁迫因子，包括镉（Cd）、汞（Hg）、砷（As）、铅（Pb）、铬（Cr）、铜（Cu）、镍（Ni）、锌（Zn）；其他项目可作为区域特征指标，由地方生态环境主管部门根据区域土壤污染特点和生态环境管理需求进行选择，并酌情纳入风险评估指标体系。

$$SPI_i = \frac{SPM_i}{SQS_i} \quad (5)$$

$$SPI_{综} = \sqrt{\frac{SPI_{iave}^2 + SPI_{imax}^2}{2}} \quad (6)$$

式中： SPI_i — 土壤中第 i 种污染元素的污染指数，无量纲；

SPM_i — 土壤中第 i 种污染元素的实测值，mg/kg；

SQS_i — 第 i 种污染元素的参比值，采用研究区所在省份土壤背景值，mg/kg；

SPI_{iave} — 土壤中各单项污染指数中的平均值，无量纲；

SPI_{imax} — 土壤中各单项污染指数中的最大值，无量纲；

$SPI_{综}$ — 土壤环境污染指数，无量纲。

6.2.4 生活垃圾危害指数

生活垃圾危害指数反映由人类活动产生的生活垃圾对城市生态系统造成的风险程度，指数越大，反映城市生态系统受生活垃圾污染的胁迫程度越高，生态风险越大。本标准推荐选取当地生活垃圾填埋场和临近水体中频繁检出且浓度较高的新兴有机污染物作为目标污染物。暴露-响应关系用剂量表示，宜采用熵值法评估生活垃圾渗滤液和生活垃圾填埋场周边地下水的风险程度。具体评价方法按公式（7）计算。

$$HQ = \frac{D_e}{D_b} \quad (7)$$

式中： HQ — 生活垃圾危害指数，无量纲；

D_e — 暴露于生活垃圾渗滤液和生活垃圾填埋场周边地下水中的污染物实测环境浓度，ng/L；

D_b — 预测的无效应浓度，ng/L。

注：预测的无效应浓度可通过查阅文献获得，或通过收集急性、慢性毒理学实验数据等计算获得。

6.2.5 工业固体废物污染指数

工业固体废物污染指数反映城市生产建设产生的工业固体废物对城市生态系统造成的风险程度，指数越大，反映城市生态系统受工业固体废物污染的胁迫程度越高，生态风险越大。工业固体废物污染的选择应依据 GB 18599，宜选择渗滤液及其处理后的排放水和无组织气体中的一种或多种。渗滤液及其处理后的排放水宜采用工业固体废物的特征组分作为控制项目，具体评估方法可按公式（8）和公式（9）计算；贮存场、填埋场产生的无组织气体

排放宜采用 GB 16297 和 GB 37822 规定的项目为控制项目，具体评估方法可按公式（10）和公式（11）计算。工业固体废物污染指数宜采用加权法，按公式（12）计算。

$$DWPI_i = \frac{DWPM_i}{DWQS_i} \quad (8)$$

$$DWPI_{\text{综}} = \sqrt{\frac{DWPI_{i\text{ave}}^2 + DWPI_{i\text{max}}^2}{2}} \quad (9)$$

$$FGPI_i = \frac{FGPM_i}{FGCL_i} \quad (10)$$

$$FGPI_{\text{综}} = \sqrt{\frac{FGPI_{i\text{ave}}^2 + FGPI_{i\text{max}}^2}{2}} \quad (11)$$

$$ISWPI = a \times DWPI_{\text{综}} + (1 - a) \times FGPI_{\text{综}} \quad (12)$$

式中： $DWPI_i$ — 渗滤液及其处理后的排放水中第 i 种污染物的污染指数，无量纲；

$DWPM_i$ — 渗滤液及其处理后的排放水中第 i 种污染物的实测值，mg/L；

$DWQS_i$ — 渗滤液及其处理后的排放水中第 i 种污染物最高允许排放浓度，mg/L，宜参考 GB 8978 中的对应项；

$DWPI_{i\text{ave}}$ — 渗滤液及其处理后的排放水各单项污染指数中的平均值，mg/L；

$DWPI_{i\text{max}}$ — 渗滤液及其处理后的排放水各单项污染指数中的最大值，mg/L；

$DWPI_{\text{综}}$ — 工业固体废物渗滤液及其处理后的排放水污染指数，无量纲。

$FGPI_i$ — 无组织气体排放中第 i 种污染物的污染指数，无量纲；

$FGPM_i$ — 无组织气体排放中第 i 种污染物的实测值，mg/m³；

$FGCL_i$ — 无组织气体排放中第 i 种污染物监控浓度限值，mg/m³，宜参考 GB 16297 中的对应项。

$FGPI_{i\text{ave}}$ — 无组织气体排放中各单项污染指数中的平均值，mg/m³；

$FGPI_{i\text{max}}$ — 无组织气体排放中各单项污染指数中的最大值，mg/m³；

$FGPI_{\text{综}}$ — 工业固体废物无组织气体排放的污染指数，无量纲；

$ISWPI$ — 工业固体废物污染指数，无量纲；

a — 权重，取值范围为 0~1。

注：针对 $DWQS_i$ 的选择，若各地市出台了更严格的污水综合排放标准，应参照当地的污染物最高允许排放浓度执行。

6.2.6 危险废物污染指数

危险废物污染指数反映城市生产建设产生的危险废物对城市生态系统造成的风险程度，指数越大，反映城市生态系统受危险废物污染的胁迫程度越高，生态风险越大。危险废物应依据 GB 5085.7 进行鉴别。危险废物可在填埋和焚烧的过程中产生污染物，填埋过程主要对大气环境和水环境产生风险，焚烧处理则对大气环境、水环境和声环境产生风险。具体操作宜选择危险废物在填埋和焚烧后产生污染物中的一种或多种。填埋过程中，渗滤液及其处理后的排放水宜采用 GB 8978 和 GB 18598 中规定的污染物项目为控制项目，具体评估方法可按公式（8）和公式（9）计算；地下水宜采用 GB/T 14848 规定的项目为控制项目，具体评估方法可按公式（3）和公式（4）计算；处理后产生的废气宜根据填埋废物特性采用 GB 16297 和 GB 37822 中的规定项目作为控制项目，具体评估方法可按公式（10）和公式（11）计算。焚烧过程中，渗滤液及其处理后的排放水宜采用 GB 8978 规定的污染物项目为控制项目，具体评估方法可按公式（8）和公式（9）计算；处理后产生的废气宜根据 GB 18484 规定的项目作为控制项目，具体评估方法可按公式（10）和公式（11）计算；焚烧过程产生的噪声宜采用厂界噪声作为控制项目，具体评估方法可按公式（13）和公式（14）计算。危险废物污染指数的计算采用加权的方法，具体评估方法可按公式（15）计算。

$$OSPI_i = \frac{OMEN_i}{OENCL_i} \quad (13)$$

$$OSPI_{综} = \sqrt{\frac{OSPI_{iave}^2 + OSPI_{imax}^2}{2}} \quad (14)$$

$$\begin{cases} HWPI = \beta \times WPI_{综} + \gamma \times DWPI_{综} + \delta \times FGPI_{综} + \varepsilon \times OSPI_{综} \\ \beta + \gamma + \delta + \varepsilon = 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $OSPI_i$ —第 i 采样点的厂界外声环境污染指数，无量纲；

$OMEN_i$ —第 i 采样点的厂界外环境噪声实测值，dB (A)；

$OENCL_i$ —第 i 采样点的厂界外环境噪声排放限值，dB (A)，宜参考 GB 12348；

$OSPI_{综}$ —厂界外声环境污染指数，无量纲；

$HWPI$ —危险废物污染指数，无量纲；

$\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ —权重。

6.2.7 声环境污染指数

声环境污染指数反映在人口增长与产业发展过程中产生的噪声污染对城市生态系统造

成的风险程度，指数越大，反映城市生态系统受噪声污染的胁迫程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（16）计算。

$$SPL_i = \frac{MEN_i}{ENCL_i} \quad (16)$$

式中： SPL_i —第*i*采样点的声环境污染指数，无量纲；

MEN_i —第*i*采样点的环境噪声实测值，dB（A）；

$ENCL_i$ —第*i*采样点的环境噪声限值，dB（A），参考 GB 3096，如表 4 所示。

表 4 环境噪声等效声级限值

单位：dB（A）

声环境功能区类别		时段	
		昼间	夜间
0 类		50	40
1 类		55	45
2 类		60	50
3 类		65	55
4 类	4a 类	70	55
	4b 类	70	60

6.2.8 动植物生活生长干扰度指数

动植物生活生长干扰度指数反映城市中由人类活动产生的光污染对动植物造成的风险程度。指标的评价可采用阈值法，具体评价方法按公式（17）计算。当城市夜景照明辐照度实测值大于动（植）物正常生活生长辐照度阈值，表明光污染对动（植）物生活生长造成胁迫，具有生态风险。

$$APG_i = \begin{cases} 0, & L < T_i \\ 1, & L \geq T_i \end{cases} \quad (17)$$

式中： APG_i —第*i*种动（植）物生活生长干扰度指数，无量纲；

L —城市夜景照明辐照度实测值，mW/m²；

T_i —第*i*种动（植）物正常生活生长辐照度阈值，mW/m²。

6.2.9 地表热环境指数

地表热环境指数反映城市土地利用变化和日常生产生活等热污染排放对地表温度造成的风险程度，指数越大，反映城市生态系统受热污染的胁迫程度越高，生态风险越大。地表温度的反演可采用遥感反演方法中的辐射传输方程法，具体评价方法按公式（18）和（19）

计算。

$$LST = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(T_S)} + 1\right)} \quad (18)$$

$$B(T_S) = \frac{[L_\lambda - L_{up} - \tau \times (1 - \varepsilon) \times L_{down}]}{\varepsilon \tau} \quad (19)$$

式中： LST — 地表热环境指数，即地表温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$B(T_S)$ — 卫星传感器接收到的温度为 T_S 的黑体辐射亮度值， $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ；

K_1 、 K_2 — 卫星传感器的定标常数，常用 Landsat 系列卫星的定标常数如表 5 所示；

L_λ — 影像热红外波段的辐射定标值，可通过辐射定标操作得到， $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ；

L_{up} — 大气上行辐射值， $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ，可在美国 NASA 网站 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 输入影像成像时间以及中心经纬度，查询该参数；

L_{down} — 大气下行辐射值， $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ，可在美国 NASA 网站 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 输入影像成像时间以及中心经纬度，查询该参数；

τ — 大气在热红外波段的透过率，可在美国 NASA 网站 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 输入影像成像时间以及中心经纬度，查询该参数；

ε — 比辐射率，水体的比辐射率赋值为 0.995，自然表面和不透水面的比辐射率分别按公式 (20)、(21) 进行计算：

$$\varepsilon_s = 0.9625 + 0.0614 \times FV - 0.0461 \times FV^2 \quad (20)$$

$$\varepsilon_b = 0.9589 + 0.086 \times FV - 0.0671 \times FV^2 \quad (21)$$

式中： ε_s — 自然表面像元的比辐射率指数，无量纲；

ε_b — 城市不透水面像元的比辐射率指数，无量纲；

FV — 植被覆盖度，无量纲；

其中，植被覆盖度利用单位面积归一化植被指数 (NDVI) 表示，按公式 (22) 计算：

$$FV = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (22)$$

式中： $NDVI_{soil}$ — 完全被裸土或无植被覆盖区域的 NDVI，取经验值为 0.05；

$NDVI_{veg}$ — 完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值，取经验值为 0.70。

表 5 Landsat 4/5/7/8 热红外波段的辐射常量 K_1 和 K_2 的值

辐射常量	Landsat 4 TM6 波段	Landsat 5 TM6 波段	Landsat 7 ETM+6 波段	Landsat 8 TIRS10 波段	Landsat 8 TIRS11 波段
$K_1/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$	671.62	607.76	666.09	774.89	480.89
K_2/K	1284.30	1260.56	1282.71	1321.08	1201.14

6.3 自然资源消耗类胁迫对应的评价终点指标的生态风险评价方法

6.3.1 生产生活供水保障率指数

生产生活供水保障率指数用于衡量工业生产、农业灌溉、居民生活以及生态需水等水资源需求与供应能否维持平衡。该指标越大，表示水资源保障程度越高，对城市生态系统在供给淡水等生态系统服务方面造成的生态风险越低。具体评价方法按公式（23）计算。

$$WG_i = \frac{SWR_i}{CW_i} \quad (23)$$

式中： WG_i —第 i 种需求的水资源保障率，无量纲；

SWR_i —第 i 种需求的水资源供应量，万 m^3 /年；

CW_i —第 i 种需求的水资源消费量，万 m^3 /年。

6.3.2 农林牧渔资源保障率指数

农林牧渔资源保障率指数用于衡量城市对农、林、牧、渔等生物资源的供应与需求能否维持平衡。该指标越大，表示农林牧渔资源的保障程度越高，对城市生态系统在供给食物、供给木材和纤维等生态系统服务方面造成的生态风险越低。具体评价方法按公式(24)计算。

$$BG_i = \frac{BSR_i}{BC_i} \quad (24)$$

式中： BG_i —第 i 种生物资源保障率，无量纲；

BSR_i —第 i 种生物资源供应量，单位可根据评价内容确定；

BC_i —第 i 种生物资源消费量，单位可根据评价内容确定。

6.3.3 生物多样性损失指数

生物多样性损失指数是反映生物资源开发利用活动对生物安全造成的风险，衡量动植物和微生物遗传资源流失、外来物种入侵以及其他生物资源受损程度。该指标越大，生物多样

性的损失程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（25）和公式（26）计算。

$$\Delta BD = BD_0 - BD_1 \quad (25)$$

$$BD = 0.30 \times KS_r + 0.70 \times (0.62 \times Q_t + 0.38 \times B_{ps}) \quad (26)$$

式中： ΔBD — 生物多样性指数变化量，无量纲；

BD_0 — 基线水平下生物多样性指数，无量纲；

BD_1 — 损害发生后的生物多样性指数，无量纲；

BD — 生物多样性指数，无量纲；

KS_r — 重点保护生物指数，无量纲；

Q_t — 指示生物类群生命力指数，无量纲；

B_{ps} — 原生功能群种占比指数，无量纲。

其中，重点保护生物指数是指评价区内已记录的符合《国家重点保护野生动物名录》和《国家重点保护野生植物名录》的高等植物、哺乳类、鸟类、爬行类和两栖类的物种数，用于表征评价区生物物种被保护情况。按公式（27）计算：

$$KS_r = A_{KS} \times AKS + 13.2142 \quad (27)$$

式中： A_{KS} — 重点保护生物指数的归一化系数，参考值为 0.1510；

AKS — 评价区内列入《国家重点保护野生动物名录》和《国家重点保护野生植物名录》的高等植物、哺乳类、鸟类、爬行类和两栖类的物种数。

指示生物类群生命力指数是指评价区内已记录的野生哺乳类、鸟类、两栖类和蝶类等生态环境指示生物类群的物种多样性的变化状况。按公式（28）计算：

$$Q_t = A_Q \times \frac{10^{-\sum_{i=1}^S P_{it} \ln P_{it} + \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \log N_{it}}}{10^{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \log P_{i0} + \log N_0}} \quad (28)$$

式中： A_Q — 指示生物类群生命力指数的归一化系数，参考值为 13.5288；

N_{it} — 第 i 个物种第 t 年的个体数量，个；

N_0 — 初始年特定类群所有物种的个体数量总和，个；

S — 第 t 年的物种数，种；

P_{it} — 第 t 年特定物种的个体数量占所评价区域内实际监测到的指示生物个体总数的比例，%；

P_{i0} — 初始年特定物种的个体数量占所评价区域内实际监测到的指示生物个体总数的比例，%。

原生功能群种占比指数是指评价区内监测样地地带性原生生态系统群落建群种生物量或生物个数占样地生物量或个数的比例情况。按公式（29）计算：

$$B_{ps} = A_{ps} \times S_{is} / S_{ts} \quad (29)$$

式中： A_{ps} — 原生功能群种占比指数的归一化系数，无量纲；

S_{is} — 评价区监测样方内的地带性原生生态系统群落建群种个体数（生物量），个（ g/m^2 ）；

S_{ts} — 评价区监测样方内的生物总个体数（总生物量），个（ g/m^2 ）。

6.4 生态空间占用类胁迫对应的评价终点指标的生态风险评价方法

6.4.1 水源涵养功能重要性丧失指数

水源涵养功能重要性丧失指数用于衡量城市建设用地扩张导致的土地利用变化引起城市生态系统水源涵养服务能力受损程度。当该指标小于 0 时，反映土地利用变化后的城市生态系统的水源涵养服务能力降低，指标越小，水源涵养功能重要性丧失程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（30）计算。宜采用生态保护红线划定指南中对水源涵养功能重要性评价的评估方法，计算水源涵养服务能力指数，具体评价方法按公式（31）计算。

$$WRLI = \frac{WR_j - WR_i}{WR_i} \quad (30)$$

$$WR = NPP_{mean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo}) \quad (31)$$

式中： $WRLI$ — 城市水源涵养功能重要性丧失指数，无量纲；

WR_i — 土地利用变化前的生态系统水源涵养服务能力指数，无量纲；

WR_j — 土地利用变化后的生态系统水源涵养服务能力指数，无量纲；

NPP_{mean} — 多年植被净初级生产力平均值，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲；

F_{sic} — 土壤渗流因子，根据土壤质地类型由粘土到砂土分别在 0~1 之间均等赋值得到，砂土为 1，无量纲；

F_{pre} — 多年平均降水量因子，由多年（大于 30 年）平均年降水量数据插值并归一化到 0~1 之间，无量纲；

F_{slo} — 坡度因子，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲。

6.4.2 水土保持功能重要性丧失指数

水土保持功能重要性丧失指数用于衡量城市建设用地扩张导致的土地利用变化引起城市生态系统水土保持服务能力受损程度。当该指标小于 0 时，反映土地利用变化后的城市生态系统的水土保持服务能力降低，指标越小，水土保持功能重要性丧失程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（32）计算。宜采用生态保护红线划定指南中对水土保持功能重要性评价的评估方法，计算水土保持服务能力指数，具体评价方法按公式（33）计算。

$$S_{proLI} = \frac{S_{pro_j} - S_{pro_i}}{S_{pro_i}} \quad (32)$$

$$S_{pro} = NPP_{mean} \times (1 - SEF) \times (1 - F_{slo}) \quad (33)$$

式中： S_{proLI} — 城市水土保持功能重要性丧失指数，无量纲；

S_{pro_i} — 土地利用变化前的生态系统水土保持服务能力指数，无量纲；

S_{pro_j} — 土地利用变化后的生态系统水土保持服务能力指数，无量纲；

NPP_{mean} — 多年植被净初级生产力平均值，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲；

SEF — 土壤可蚀性因子，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲；

F_{slo} — 坡度因子，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲。

6.4.3 防风固沙功能重要性丧失指数

防风固沙功能重要性丧失指数用于衡量城市建设用地扩张导致的土地利用变化引起城市生态系统防风固沙服务能力受损程度。当该指标小于 0 时，反映土地利用变化后的城市生态系统的防风固沙服务能力降低，指标越小，防风固沙功能重要性丧失程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（34）计算。宜采用生态保护红线划定指南中对防风固沙功能重要性评价的评估方法，计算防风固沙服务能力指数，具体评价方法按公式（35）计算。

$$S_{wsLI} = \frac{S_{ws_j} - S_{ws_i}}{S_{ws_i}} \quad (34)$$

$$S_{ws} = NPP_{mean} \times SEF \times F_q \times S_r \quad (35)$$

式中： S_{wsLI} — 城市防风固沙功能重要性丧失指数，无量纲；

S_{ws_i} — 土地利用变化前的生态系统防风固沙服务能力指数，无量纲；

S_{ws_j} — 土地利用变化后的生态系统防风固沙服务能力指数，无量纲；

NPP_{mean} — 多年植被净初级生产力平均值，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲；

SEF — 土壤可蚀性因子，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲；

F_q — 多年平均气候侵蚀力，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲；

S_r — 地表粗糙度因子，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲。

6.4.4 生物多样性功能重要性丧失指数

生物多样性功能重要性丧失指数用于衡量城市建设用地扩张导致的土地利用变化引起城市生态系统生物多样性服务能力受损程度。当该指标小于 0 时，反映土地利用变化后的城市生态系统的生物多样性服务能力降低，指标越小，生物多样性功能重要性丧失程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（36）计算。宜采用生态保护红线划定指南中对生物多样性功能重要性评价的评估方法，计算生物多样性服务能力指数，具体评价方法公式（37）计算。

$$S_{bioLI} = \frac{S_{bio_j} - S_{bio_i}}{S_{bio_i}} \quad (36)$$

$$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \quad (37)$$

式中： S_{bioLI} — 城市生物多样性功能重要性丧失指数，无量纲；

S_{bio_i} — 土地利用变化前的生态系统生物多样性服务能力指数，无量纲；

S_{bio_j} — 土地利用变化后的生态系统生物多样性服务能力指数，无量纲；

NPP_{mean} — 多年植被净初级生产力平均值，采用最大值最小值法将得到的数据归一化到 0~1 之间，无量纲；

F_{pre} — 由多年（大于 30 年）平均年降水量数据插值并归一化到 0~1 之间，无量纲；

F_{tem} — 气温参数，由多年（10-30 年）平均年降水量数据插值获得，得到的结果归一

化到 0~1 之间，无量纲；

F_{alt} — 海拔参数，由研究区海拔进行归一化获得，无量纲。

6.4.5 水土流失敏感性增强指数

水土流失敏感性增强指数用于衡量城市建设用地扩张导致的土地利用变化引起城市生态系统水土流失灾害发生的风险程度，该指标越大，反映城市生态系统的水土流失敏感性增强程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（38）计算。宜采用生态保护红线划定指南中对水土流失敏感性评价的评估方法，计算水土流失敏感性指数，具体评价方法按公式（39）计算。

$$SSIL = \frac{SS_j - SS_i}{SS_i} \quad (38)$$

$$SS = \sqrt[4]{R \times SEF \times LS \times C} \quad (39)$$

式中： $SSIL$ — 水土流失敏感性增强指数，无量纲；

SS_i — 土地利用变化前的生态系统水土流失敏感性指数，无量纲；

SS_j — 土地利用变化后的生态系统水土流失敏感性指数，无量纲；

R — 降雨侵蚀力的敏感性等级值，无量纲；

SEF — 土壤可蚀性的敏感性等级值，无量纲；

LS — 地形起伏度的敏感性等级值，无量纲；

C — 植被覆盖度的敏感性等级值，无量纲。

6.4.6 土壤沙化敏感性增强指数

土壤沙化敏感性增强指数用于衡量城市建设用地扩张导致的土地利用变化引起城市生态系统土壤沙化灾害发生的风险程度，该指标越大，反映城市生态系统的土壤沙化敏感性增强程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（40）计算。宜采用生态保护红线划定指南中对土壤沙化敏感性评价的评估方法，计算土壤沙化敏感性指数，具体评价方法公式（41）计算。

$$SDSI = \frac{SD_j - SD_i}{SD_i} \quad (40)$$

$$SD = \sqrt[4]{I \times W \times K \times C} \quad (41)$$

式中： $SDSI$ — 土壤沙化敏感性增强指数，无量纲；

SD_i — 土地利用变化前的生态系统土壤沙化敏感性指数，无量纲；

SD_j — 土地利用变化后的生态系统土壤沙化敏感性指数，无量纲；

I — 干燥度指数的敏感性等级值，无量纲；

W — 起沙风天数的敏感性等级值，无量纲；

K — 土壤质地的敏感性等级值，无量纲；

C — 植被覆盖度的敏感性等级值，无量纲。

6.4.7 石漠化敏感性增强指数

石漠化敏感性增强指数用于衡量城市建设用地扩张导致的土地利用变化引起城市生态系统石漠化灾害发生的风险程度，该指标越大，反映城市生态系统的石漠化敏感性增强程度越高，生态风险越大。具体评价方法按公式（42）计算。宜采用生态保护红线划定指南中对石漠化敏感性评价的评估方法，计算石漠化敏感性指数，具体评价方法按公式（43）计算。

$$RDSI = \frac{RD_j - RD_i}{RD_i} \quad (42)$$

$$RD = \sqrt[3]{Z \times P \times C} \quad (43)$$

式中： $RDSI$ — 石漠化敏感性增强指数，无量纲；

RD_i — 土地利用变化前的生态系统石漠化敏感性指数，无量纲；

RD_j — 土地利用变化后的生态系统石漠化敏感性指数，无量纲；

Z — 碳酸岩出露面积百分比的敏感性等级值，无量纲；

P — 地形坡度的敏感性等级值，无量纲；

C — 植被覆盖度的敏感性等级值，无量纲。

6.4.8 生境质量干扰指数

生境质量干扰指数反映城市交通扩张导致生物栖息地受损而造成的风险程度，具体评估方法可按公式（44）计算。宜选择干线公路车道和铁路的路网铺装面积作为胁迫因子。生境质量干扰指数越大，城市生态系统中的生物栖息地受到的负面影响越大，生态风险越大。

$$HQDI_i = V_i \cdot E_i \quad (44)$$

式中： $HQDI_i$ — 网格 i 中的生境质量干扰强度，无量纲；

V_i — 网格 i 的生境脆弱度指数，无量纲；

E_i — 网格 i 的景观格局干扰指数，无量纲。

其中,生境脆弱度指数反映的是景观组分在城市化进程中提供栖息地这一支持服务的水平高低,生境脆弱度指数越高,表征城市生态系统抵御外部干扰的能力越低。按公式(45-46)计算:

$$V_i = \sum_{j=1}^m V_j \cdot AREA_{ij} \quad (45)$$

$$AREA_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_i} \quad (46)$$

式中: V_j — 景观类型 j 的脆弱度系数,无量纲,宜按照每种景观类型的脆弱度等级(表6)进行归一化处理;

V_i — 网格 i 的景观脆弱度指数,无量纲;

$AREA_{ij}$ — 网格 i 中景观类型 j 的景观面积指数,无量纲;

m — 研究区域内不同景观类型的数量,个;

A_{ij} — 网格 i 中景观类型 j 的面积, m^2 ;

A_i — 网格 i 的总面积, m^2 。

景观格局综合指数通过景观破碎度、景观分离度以及优势度指数三个指标构建,景观格局综合指数描述了景观组分的组合形式以及空间分布特征,反映景观破碎化对城市生态系统产生的直接影响。景观干扰度指数越高,表征城市生态系统受到的外部干扰程度越高。按公式(47-53)计算:

$$E_i = x \cdot Cn_i + y \cdot Sn_i + z \cdot Dn_i \quad (47)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^m C_{ij} \quad (48)$$

$$C_{ij} = \frac{N_{ij}}{A_{ij}} \quad (49)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^m S_{ij} \quad (50)$$

$$S_{ij} = \frac{DIS_{ij}}{AREA_{ij}} \quad (51)$$

$$DIS_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{N_{ij}}{A_i}} \quad (52)$$

$$D_i = \ln m + \sum_{j=1}^m \left(\frac{A_{ij}}{r_i} \right) \ln \left(\frac{A_{ij}}{r_i} \right) \quad (53)$$

式中： C_{ni} — 网格 i 景观破碎度归一化指数，按网格 i 的景观破碎度指数 C_i 在所有网格景观破碎度指数的排位与总网格数量的商计算，无量纲；

S_{ni} — 网格 i 景观分离度归一化指数，按网格 i 的景观分离度指数 S_i 在所有网格景观分离度指数的排位与总网格数量的商计算，无量纲；

D_{ni} — 网格 i 景观优势度指数归一化指数，按网格 i 的景观优势度指数 D_i 排在所有网格景观优势度指数的排位与总网格数量的商计算，无量纲；

C_i — 网格 i 的景观破碎度，无量纲；

S_i — 网格 i 的景观分离度，无量纲；

D_i — 网格 i 的景观优势度指数，无量纲；

C_{ij} — 网格 i 中景观类型 j 的景观破碎度，无量纲；

S_{ij} — 网格 i 中景观类型 j 的景观分离度，无量纲；

x — 景观破碎度的权重值，赋值为 0.5；

y — 景观分离度的权重值，赋值为 0.3；

z — 景观优势度的权重值，赋值为 0.2；

N_{ij} — 网格样本 i 中景观类型 j 的斑块数，个；

r_i — 道路铺装的影响面积， m^2 。

表 6 景观类型的脆弱度等级

景观类型	脆弱度等级
建设用地	1 级
林地	2 级
园地	3 级
草地	4 级
耕地	5 级
水体	6 级
未利用地	7 级
湿地	8 级

6.4.9 重要生态空间连通度指数

重要生态空间连通度指数用于评价重要生态空间斑块之间的整体连通程度。宜采用《区域生态质量评价办法（试行）》中重要生态空间连通度指数的评估方法，以重要生态空间斑块的面积与相间距离作为胁迫因子。具体评价方法按公式（54-55）计算，该指数越小，表明

区域内重要斑块的空间连接度越低，生态风险越大。

$$PC = A_{pc} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times P_{ij}^*}{LA^2} \quad (54)$$

$$P_{ij} = e^{-k \times d_{ij}} \quad (55)$$

式中： PC — 重要生态空间连通度指数；重要生态空间指将林地、草地、水域和沼泽地进行合并后，面积大于 0.1 km^2 的斑块；

A_{PC} — 重要生态空间连通度指数的归一化系数，参考值为 103.70；

n — 重要生态空间斑块的总数量，个；

a_i — 斑块 i 的面积， km^2 ；

a_j — 斑块 j 的面积， km^2 ；

LA — 区域国土面积， km^2 ；

P_{ij}^* — 斑块 i 和斑块 j 之间所有路径最终连通性的最大值，即斑块 i 和 j 之间所有可能路径 P_{ij} 的最大乘积概率；

P_{ij} — 斑块 i 与 j 之间的直接扩散概率；

d_{ij} — 斑块 i 与 j 之间的最低成本距离，在此指最短距离， km ；

k — 常数项，通过物种平均扩散距离和设置的概率值确定，推荐平均距离为 5 km ，概率设置为 0.5。

6.4.10 海（水）域开发强度指数

海（水）域开发强度指数指评价区海岸线向海（湖）一侧，填海造地、围海、构筑物用海面积之和占管辖海（湖）域面积比例情况，反映城市生态系统周边围填海（湖）活动的强弱程度。宜采用《区域生态质量评价办法（试行）》中海域开发强度指数的评价方法，以填海造地面积、围海面积、构筑物用海面积作为胁迫因子，海（水）域开发强度指数按公式（56）计算。海（水）域开发强度指数越大，海（水）域在提供栖息地等生态系统服务受到的负面影响越大，生态风险越大。

$$SDI = A_{SDI} \times \frac{S_{LR} + S_L + S_{LS}}{S_{sea}} \quad (56)$$

式中： SDI — 海（水）域开发强度指数，无量纲；

A_{SDI} — 海（水）域开发强度指数的归一化系数，参考值为 100；

S_{LR} — 填海（湖）造地面积，含建设填海（湖）造地和农业填海（湖）造地， km^2 ；

S_L — 围海（湖）面积，含围海（湖）养殖、盐业和港池等， km^2 ；

S_{LS} — 构筑物用海（湖）面积，含非透水构筑物和透水构筑物， km^2 ；

S_{sea} — 管辖海（湖）域，指评价区域海（湖）岸线（海/湖岸线依据省级人民政府批复数据）向海洋（湖）方向延伸 2 km 的面积， km^2 。
