

# 基于最小累积阻力模型的贵阳市 景观生态安全格局构建

蒙吉军 王雅 王晓东 周朕 孙宁

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

环境保护部中国环境规划院, 北京 100012)

**【摘要】**贵阳市是我国典型的喀斯特地貌, 水土流失严重, 生态环境脆弱。在生态重要性、景观连通性和生态需求分析的基础量进行生态源地识别, 根据土地覆被状况、人为干扰程度和夜间灯光数据构建了生态阻力面, 基于最小累积阻力模型识别生态廊道网络, 在此基础上构建了贵阳市域和市区的景观生态安全格局。结果表明: (1) 贵阳市最重要和重要生态斑块总面积 5393.43km<sup>2</sup>, 主要分布在西部和北部: 生态用地斑块的景观连通度总体较高, 其中园地最好, 林地最差; 生态需求较高的区域主要分布在人口密集的城市围成区周边。生态源地占总面积的 18.56%, 集中分布北部及内南部红枫湖、百花湖等区域; (2) 贵阳市生态廊道总长为 933.58km, 其中关键廊道长 287.6km, 沿东北向西南方向延伸。现状廊道遍布市域, 主要为河流水系; 潜在廊道和关键廊道 98% 都为林地, 主要分布于北部和西部生态环境较好的山地丘陵区; (3) 市区景观生态安全格局中, 生态源地主要集中在百花湖、红枫湖、香纸沟、相思河等风景区, 花溪湿地和南明河作为市区关键廊道纵贯南北。最后, 在此基础上提出了“保护和建设并重、区县间统一规划的”生态系统管理对策, 为贵阳市生态环境建设提供切实可行的科学指导。

**【关键词】**极小累积阻力模型; 生态源地; 生态廊道; 生态安全格局; 贵阳市

**【中图分类号】**X171 **【文献标识码】**A

**【文章编号】**1004-8227(2016)07-1052-10

**【DOI】**10.11870/cjlyzyyhj201607006

自人类社会步入工业文明以来, 随着人口的激增和工程技术的不断发展, 人类以前所未有的速度和规模改变着自然生态环境, 导致了許多生态环境问题的出现, 严重威胁区域可持续发展。因此, 以生态安全为目标的区域生态安全格局优化已经成为迫切需求。生态安全格局(Ecological security pattern)是指针对特定的生态环境问题, 以生态、经济、社会效益最优为目标, 依靠一定的技术手段, 对区域内的各种自然和人文要素进行安排、设计、组合与布局, 得到由点、线、面、网组成的多目标、多层次和多类别的空间配置方案。区域生态安全格局构建以生态格局、过程和功能及其相互关系为研究对象, 能够将生态系统管理对策落实到空间地域上, 是解决生态脆弱区生态环境问题的重要途径, 对于改善生态环境质量, 保障生态系统安全, 实现区域可持续发展具有重要意义。

Forman 首先系统地总结了景观格局的优化方法, 俞孔坚在此基础上首次提出了景观生态安全格局的概念, 此后相关研究逐渐成为热点。随着土地利用规划、景观生态学理论不断发展, 生态安全格局研究对象从集中于景观组分和斑块的数量结构配置, 转而更加关注生态格局对水土流失、物种迁移等生态过程的影响; 研究内容从土地利用格局优化到注重干扰胁迫的景观生态安全格局构建, 经历了一个从定性到定量, 从静态到动态, 从单一到综合的演变过程。Forman 1986 年提出的“不可替代格局”和“集聚间有离析”两大概念模型是早期格局优化的重要方法, 随着 3S 技术的不断发展, 生态安全格局构建的方法也日趋多样和完善。陈利顶等提出了“源-汇”景观理论和规划方法。张玉虎等借助有效费用距离模型(ECDM)构建了妙峰山景区生态安全格局。刘吉平等利用最小累积阻力模型(MCR)和 GAP 分析设计了三江平原东北部湿地生态安全格局。近年来, 俞孔坚提出的确定生态源地、建立阻力面和判别安全格局的三步骤, 已经成为生态安全格局构建的基本模式, 并成功指导多个区域生态安全格局构建。这些方法的建立和区域案例的分析极大地推动了该研究的理论化、规范化发展。

贵阳市是我国喀斯特地貌集中分布的地区, 长期以来, 由于自然条件和人类活动的双重作用, 水土流失严重, 石漠化较为普遍。许多区域植被破坏、土壤侵蚀、岩石裸露、土地生产力逐步退化和丧失, 地表呈现类似荒漠景观, 成为了我国典型的生态脆弱区。本文基于生物多样

性保护、土壤保持、水资源安全进行生态重要性评价,结合生态用地景观连通性和人类需求识别生态源地;基于人为干扰程度构建基本生态阻力面并识别生态廊道。最后,结合生态源地、生态廊道和现状廊道构建贵阳市域和市区的景观生态安全格局,为区域生态系统管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

贵阳市位于云贵高原东部、苗岭中部、贵州省中部,地理坐标为 $106^{\circ}07'$ 、 $107^{\circ}17'E$ , $26^{\circ}11' \sim 27^{\circ}22'$ 。辖六区(云岩区、南明区、白云区、乌当区、花溪区、观山湖区)、一市(清镇市)、三县(修文县、开阳县、息烽县)(图1),总面积 $8034\text{km}^2$ 。属亚热带季风湿润气候,多年平均气温 $15.3^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量 $1095.7\text{mm}$ 。地貌类型多样,主要为中中山、低中山、低山及丘陵地貌,平均海拔 $1200\text{m}$ 左右。岩溶面积、石漠化面积和水土流失面积占总面积的 $85.02\%$ 、 $28.04\%$ 和石漠化和水土流失已成为加剧生态系统脆弱性和敏感性最为突出的生态问题。

本文土地覆被数据来自贵阳市国土资源局提供的国土资源二次调查数据(2011),根据研究目的和需求,根据《土地利用现状分类 GB/T21010-2007》将用地类型合并为水田、旱地、园地、有林地、灌木林地、草地、建设用地、水域和未利用地共9类。DEM数据来自国家科学数据服务平台(<http://www.cnisc.cn/zcfw/sjfw/gjkxsjjx/>),分辨率为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ ;NDVI数据来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站

(<http://www.gscloud.cn>),2012年1~7月SPOT-VGT植被数据(每月3期),分辨率为 $250\text{m} \times 250\text{m}$ ;夜间灯光数据为美国国家地球物理数据中心DMSPF18卫星获取的2012年DMSP\_OLS灯光数据,空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ ;土壤侵蚀数据来自“中国生态系统与生态功能区划专题数据库”(<http://www.ecosystem.csdb.cn/>)“贵州省土壤侵蚀”数据,分辨率为 $500\text{m} < 500\text{m}$ 。贵阳市建成区范围来自《贵阳市生态功能区划》(2009)。

## 2 研究方法

### 2.1 生态源地识别

源地是物种扩散和维持的源点,在维持景观格局的健康与完整、满足人类生态需求方面具有重要地位。一般来说,生态源地要满足以下3个条件:能够提供重要生态服务功能,具有良好的景观连通性,在区域中有很高的被需求程度。基于此,本文选取生态重要性评价、景观连接性分析、生态需求分析进行生态源地的综合识别。

#### 2.1.1 生态重要性分析

生态重要性体现了生态系统在提供生态系统服务方面具有的重要地位,是识别生态源地的重要途径。本文结合贵阳市生态环境特点,从生物多样性、土壤保持和水资源安全3个方面进行生态重要性评价。

#### 生物多样性评价

一般而言,生物多样性服务功能高的区域能够提供较好的生境。不同的土地利用类型保持生物资源的能力不同,根据谢高地等(2003)制定的生物多样性服务当量,参考单位面积服务价值系数修正相关研究,得到基本生物多样性服务当量(表1)。

对于相同的生态系统,因植被覆盖度的差异会造成内部生态服务价值明显的不同。已有研究表明,NDVI值与生态系统服务价值之间存在很好的相关性,一般NDVI值越高,生态系统服务价值越高。本文对贵阳市2012年1~7月SPOT\_VGT植被NDVI数据(每月3期,共21期)求平均作为全年NDVI均值,再根据下式修正生物多样性服务当量:

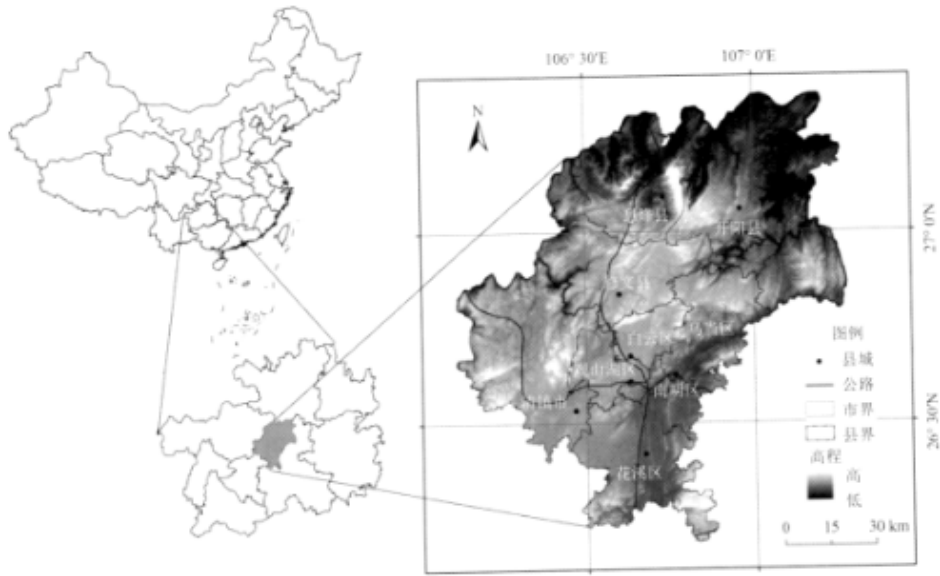


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical Location of Research Area

表1 贵阳市基本生态系统生物多样性服务当量(DL<sub>0</sub>)

Tab.1 Value of Ecological Service in Guiyang (DL<sub>0</sub>)

地类	DL <sub>0</sub>	地类	DL <sub>0</sub>
有林地	52.7	茶园	35.79
疏林地	47.03	其他园地	36.19
其他林地	34.42	草地	17.46
水田	20.62	水体	110.88
水浇地	21.73	未利用地	1
旱地	16.67	建设用地	1
果园	35.08		

$$DL' = \frac{NDVI_i}{NDVI_t} \times DL_0 \quad (1)$$

式中： $DL'$ 为基于NDVI修正的生物多样性服务当量； $NDVI_i$ 为栅格*i*对应的NDVI均值； $NDVI_t$ 为栅格*i*对应的景观类型*t*中所有栅格的平均NDVI均值； $DL_0$ 为栅格*i*对应的景观类型*t*的基本生物多样性服务当量。

土壤保持重要性评价土壤保持是生态系统提供的重要调节服务之一，在区域侵蚀控制以及生态安全的维持方面具有不可替代的作用。贵阳市岩溶地貌分布广阔，石漠化敏感区面积大，土壤保水保土差，易引发水土流失。本研究采用修正的通用土壤侵蚀方程模型进行土壤保持重要性评价：

$$A_1 = A_0 - A = R \times K \times LS - R \times K \times LS \times C \times P = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式中： $A_1$ 为单位面积的土壤保持量， $A_0$ 为单位面积潜在土壤侵蚀量； $A$ 为预测土壤侵蚀量，单位均为 $t/(hm^2 \cdot a)$ ； $R$ 为降雨侵蚀力； $K$ 为土壤可侵蚀因子； $L$ 为坡长因子； $S$ 为坡度因子； $C$ 为植被覆盖因子； $P$ 为土壤保持措施因子。

植被覆盖因子 C 是在相同的土壤、坡度和降雨条件下,某一特定作物或植被覆盖时的土壤流失量与耕种过后连续休耕地的土壤流失量的比值。土壤保持措施因子 P 是采取水保措施后,土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值。本文参考许月卿等 [25] 在贵州省猫跳河流域和曾凌云 [26] 在贵州省红枫湖流域的研究成果,结合本文生态系统分类,确定 C/P 因子值。

### 水资源安全重要性评价

由于岩溶地貌区地下溶洞、暗河的发育,贵阳市属于工程型缺水、资源型缺水和水质型缺水并存的地区。水资源安全是从整个流域出发,留出可供调、滞、蓄洪的湿地和河道缓冲区,满足洪水自然宣泄的空间,同时保障区域水安全的水源保护地。因此,本研究水资源安全重要性主要从保障区域洪水安全以及水资源保护两个方面进行识别。其中,区域洪水安全通过河流缓冲区距离来进行评价;水资源保护通过植被水源涵养重要性以及水体分布来进行评价。根据贵阳市水文

条件、植被覆盖状况和相关文献构建指标体系如表 2。

**表 2 贵阳市水资源安全重要性评价体系**

Tab.2 Evaluation System of the Importance of Water Resource Security in Guiyang

影响目标	重要性类型、范围	重要性	赋值
河流、湖泊、 水库	河流、湖泊、水库200 m缓冲区	最重要	5
	河流、湖泊、水库400 m缓冲区	重要	4
	河流、湖泊、水库600 m缓冲区	次重要	3
植被类型	林地	最重要	5
	园地	重要	4
	草地	次重要	3
	农田	一般重 要	2
	其他	不重要	1

生态重要性综合评价上述评价结果均通过分位法划分为 5 个等级,即最重要、重要、次重要、一般重要和不重要,并分别赋值为 5、4、3、2、1。综合考虑生态系统服务、土壤保持和水资源安全的影响,取每一栅格内重要性等级最高值作为生态重要性综合评价结果。

### 2.1.2 景观连通性分析

景观连通性反映了景观对生态流的便利或阻碍程度,维持良好的连通性是保护生物多样性和维持生态系统稳定性和整体性的关键。PC 指数既可反映景观的连通性,又可计算景观中各斑块对景观连通性的重要值,是衡量景观格局与功能的重要指标,其计算公式:

$$I_{PC} = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_i a_j p_{ij}}{A_L^2} \quad (3)$$

式中： $n$ 表示景观中斑块总数； $a_i$ 和 $a_j$ 分别表示斑块 $i$ 和斑块 $j$ 的面积； $A_L$ 是研究区的总面积； $p_{ij}$ 是物种在斑块 $i$ 和斑块 $j$ 直接扩散的概率， $0 < I_{PC} < 1$ 。

斑块重要值( $dI$ )指斑块对景观保持连通的重要性，即在此点处断裂(或移除)后整个区域景观连通性的变化量。根据式4计算每个斑块在整个景观中的重要值( $dI$ )，记为 $dPC$ ，从而分析研究区内斑块的重要性程度：

$$dI(\text{do}) = 100 \times \frac{I - I_{\text{remove}}}{I} \quad (4)$$

式中： $I$ 表示景观中所有斑块的整体指数值； $I_{\text{remove}}$ 是去除单个斑块后剩余斑块的整体指数值。 $dI$ 值越高，表示该斑块在景观连通中的重要性越高，在区域中的核心地位越明显。本研究采用 $dPC$ 来评价斑块结构重要性，以生态用地(林地、

耕地、园地、草地和水域)为生境斑块，研究区作为背景景观，通过Conefor Sensinode 2.6进行生态用地斑块连通性分析。

### 2.1.3 生态需求分析

生态重要性不仅要考虑生态用地本身的重要程度，还应考虑生态用地的被需求程度。由于生态用地所处空间位置和社会条件的差异，导致区域内生态需求程度空间差异显著。夜间灯光数据较好表征了城市化水平、经济状况、人口密度、能源消耗等人类活动因子，是人类活动强度和范围的良好体现。夜间灯光指数(TLI)为0表示无灯光区域，灰度值越大表示该处灯光亮度越高、人类活动越剧烈，本文通过此来表征人类生态需求。

在贵阳市域范围内，人们对生态用地的需求体现在两个方面：工作日的休憩和双休日的短途出行。对于日常休憩，通常考虑离社区最近距离的生态用地，且离社区越近，生态用地被使用的频次就越高，即生态需求越高；对于双休日的出行活动，主要考虑生态用地满足的社会需求，通过不同扩散半径下的TLI集聚强度来表征，对应服务半径内社会需求越大，生态需求越高。设置需求半径为10km，基于核密度原理计算不同扩散半径下的生态需求聚集强度，这里的扩散半径即生态用地的服务需求半径。计算公式：

$$RI_i = \frac{PD_i}{ED_i} \quad (5)$$

式中： $RI_i$ 为生态用地栅格 $i$ 对应的生态需求值； $PD_i$ 为栅格 $i$ 对应的以10km为扩散半径的生态需求核密度函数值； $ED_i$ 表示生态用地栅格 $i$ 与其邻近的有效需求点的最短距离。

### 2.1.4 生态源地识别

生态功能重要性与景观连通性综合反映了生态用地重要性，生态需求则反映生态用地满足人类需求的迫切性。由此，本研究从生态用地的质量和提供服务的能力两个角度出发来识别生态源地，计算公式：

$$PI = SI_i + RI_i = \frac{(EI+CI)_i - (EI+CI)_{\min}}{(EI+CI)_{\max} - (EI+CI)_{\min}} + \frac{NI_i - NI_{\min}}{NI_{\max} - NI_{\min}} \quad (6)$$

式中： $PI_i$ 为栅格*i*对应的生态用地保护指数； $SI_i$ 为栅格*i*对应的归一化生态功能重要性评价等级值， $RI_i$ 为栅格对应的归一化生态需求值； $EI$ 为生

态功能重要性综合评价等级值； $CI$ 为景观连通性等级值； $(EI+CI)_i$ 为栅格*i*对应的生态功能重要性综合评价等级值与景观连通性等级值的加和； $(EI+CI)_{\max}$ 和 $(EI+CI)_{\min}$ 分别代表两者之和的最大值和最小值； $NI_i$ 为栅格*i*对应的生态需求值； $NI_{\max}$ 、 $NI_{\min}$ 分别代表所有栅格中的生态需求最大值和最小值。

利用分位法将生态用地保护指数划分为5个等级，即最重要、重要、次重要、一般重要和不重要，并选取最重要的一级生态用地作为景观生态安全格局的源地。

## 2.2 生态阻力面构建

物种水平空间运动的生态过程以及生态功能的流动与传递，主要受土地覆被状态和人为干扰程度的影响。参考相关研究，将贵阳市各土地利用类型对物种和生态系统的阻力系数拟定在1~500之间(表3)。

表3 贵阳市基本生态阻力系数

Tab.3 Basic Ecological Resistance Coefficients in Guiyang

地类	林地	草地	园地	耕地	水体	未利用地	建设用地
基本阻力面	1	10	20	30	50	300	500

由于人类干扰是物种扩散的重要阻力之一，本文采用夜间灯光指数修正生态阻力系数：

$$R' = \frac{TLI_i}{TLI_a} \times R \quad (7)$$

式中： $R'$ 为基于夜间灯光指数修正的栅格生态阻力系数； $TLI_i$ 为栅格*i*的灯光指数； $TLI_a$ 为栅格*i*对应的景观类型*a*的平均灯光指数； $R$ 为栅格*i*的景观类型的基本阻力系数。

## 2.3 生态廊道识别

生态廊道是连接相邻的生态源地之间的通道，是物种迁移和扩散的重要路径。空间上，生态廊道为阻力面上相邻两源之间的最小阻力谷线。由于最小累积阻力模型(MinimumCumulativeResistance, 简称MCR)考虑了源、距离和景观界面特征，来计算物种从源地到目的地运动过程中所需要耗费的代价。因此，本文采用MCR模型来提取生态源地之间的

廊道。基本公式如下：

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (8)$$

式中：MRC为最小累积阻力值； $D_{ij}$ 为物种从

源地 $j$ 到景观单元 $i$ 的空间距离； $R_i$ 为景观单元 $i$ 对某物种运动的阻力系数； $f$ 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。

最小累积阻力方面反映了哺乳动物的迁徙、植物种子的传播等物种扩散的空间和时间过程，表示生态过程从源地到目标点的最小累积耗费距离，可借助 ArcGIS 中的 Distance 模块实现。本研究将生态源地斑块的中心点作为源/汇点，通过 ArcGIS 中的 Distance 模块进行模拟，提取并判别生态廊道网络。具体方法：首先，一次提取每个源/汇点到其他所有源/汇点的最小耗费路径；然后，将所有两点之间的最小耗费路径进行合并叠加，生成所有源汇点之间两两迁徙的生态廊道网络；最后，得到基于单元的最小耗费路径网络，将其作为潜在廊道；得到基于图层的最小耗费路径网络，将其作为关键廊道；关键廊道是潜在廊道的重要组成部分。

### 3 结果分析

#### 3.1 贵阳市域景观生态安全格局

##### 生态源地识别

贵阳市最重要生态斑块和重要生态斑块主要分布在贵阳市西部和北部(图 2a)，其中最重要斑块面积为 4246.73km<sup>2</sup>，占总面积的 52.27%；重要斑块面积为 1146.7km<sup>2</sup>，占总面积的 14.12%；次重要斑块面积为 1173.93km<sup>2</sup>，占总面积的 14.45%。贵阳市生态用地斑块的景观连通度性普遍较好(图 2b)，尤其是西北部森林和耕地都具有较高的连通性。但不同生态用地的景观连通性差异明显，园地集中分布在城镇周围，景观连通性最好；林地的景观连通性最差，主要贵阳地形较为破碎，山地与坝子相间分布。生态需求较高的区域主要分布在人口密集的城市建成区周边(图 2c)。生态源地空间分布如图 3a。生态源地总面积为 1490.34km<sup>2</sup>，占贵阳市总面积的 18.56%，集中分布在贵阳市北部地区及西南部红枫湖、百花湖等区域。从行政区来看，主要分布在开阳县和息烽县，分别占 60.73%和 23.91%；其次为修文县和清镇市，分别占 8.23%和 4.1%。

##### 生态廊道识别

贵阳市生态廊道空间分布如图 3b。现状廊道主要由河流水体组成，遍布市域；潜在廊道主要分布在生态环境较好的山地丘陵地区，避开人为干扰较大的城镇区域，为源地之间的物种迁徙和能量流通起到很好的桥梁作用；关键廊道整体由东北向西南方向延伸，北部分支呈西北-东南向，与贵阳北部低海拔丘陵和中部的中海拔山地走势基本一致。贵阳市生态廊道总长度为 933.58km，其中关键廊道长 287.6km。从生态系统类组组成来看，关键廊道超过 98%都是由林地组成，还有少部分草地和耕地组成，极少部分水体和园地(表 4)；潜在‘道的组成与关键廊道基本一致。

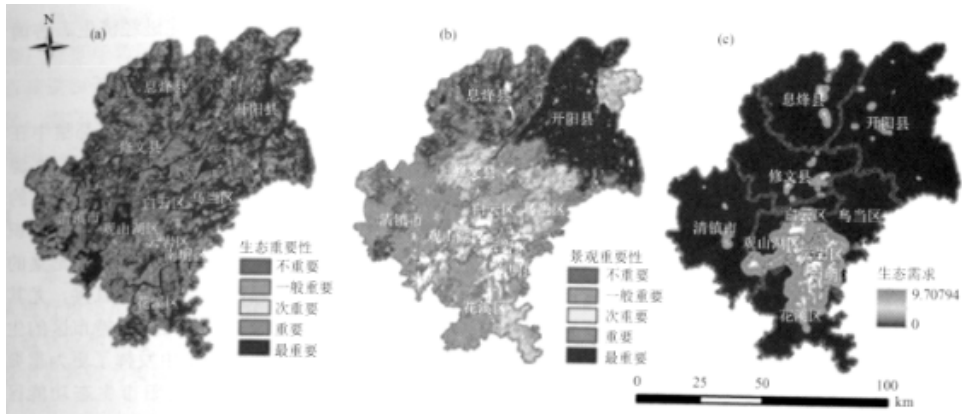


图2 贵阳市生态重要性(a)、景观连通度(b)、生态需求(c)空间分布

Fig.2 Spatial Patterns of the Ecological Importance (a), Landscape Connectivity (b) and Ecological Requirement(c) in Guiyang

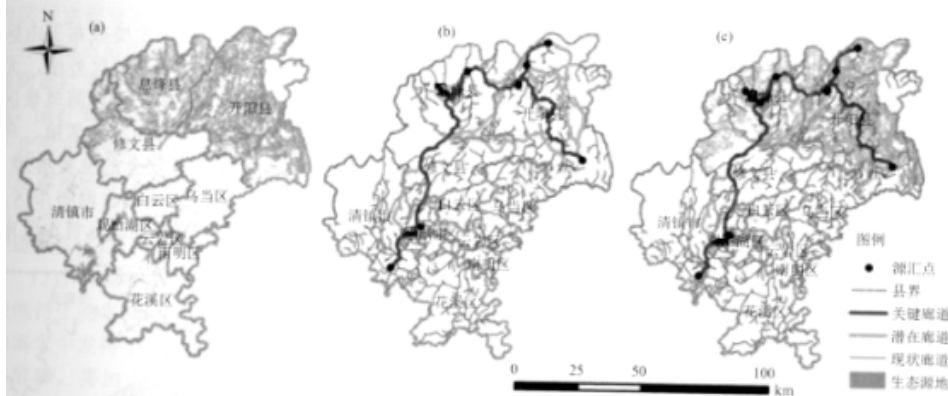


图3 贵阳市生态源地(a)、生态廊道(b)、生态安全格局(c)

Fig.3 Ecological Sources (a), Ecological Corridors (b) and Ecological Security Pattern (c) of Guiyang

表4 贵阳市生态廊道的构成(%)

Tab.4 Ecosystem Constitutes of Ecological Corridors in Guiyang

生态系统类型	林地	草地	耕地	园地	水体	荒漠	城镇
潜在廊道	98.81	0.40	0.61	0.02	0.14	0	0.01
关键廊道	98.30	0.06	0.08	0.02	0.30	0	0.01

### 3.1.3 生态安全格局构建

自2008年起,贵阳市大力推进生态文明建设,全市生态环境质量显著提高。但该地区喀斯特地貌特征明显,仍存在生态环境脆弱、生产方式粗放、产业结构不够合理等问题威胁区域生态安全。目前,贵阳市生态建设有还没有明确的生态安全格局进行指导,重点保护、治理和建设区域基本为现有自然保护区、风景名胜区和两湖五库地区。本文所构建的贵阳市景观生态安全格局(图3c),可指导贵阳市进行科学系统地生态环境建设。

贵阳市生态源地主要集中在北部,包括开阳县除龙水乡、米坪乡、花梨乡的大部分区域、息烽县的大部分区域、修文区的西北部。该区域主要以喀斯特地貌为主,石漠化、水土流失严重,水资源匮乏。作为重要的生态屏障,应当加大生态整治力度,继续采取封山育林、荒山造林、退耕还林等措施恢复植被,改造现有树种结构单一、林分质量较差的低效林,实施保土耕作,修建小水窖、沉沙池、沟渠、提灌站等建设,综合利用生物措施和工程措施,因地制宜开展石漠化小流域综合治理。加快农村产业结构调整,走生态农业发展道路,避免不合理的土地利用方式加剧水土流失、石漠化等灾害;实施生态移民,保障生态过程的正常进行,提升生态系统的服务功能。此外,清镇市西南部的红枫湖、百花湖等区域也是重要的生态源地(占总源地面积的4.1%),作为贵阳市重要的饮用水水源地,严禁向河道、水体排污;禁止毁林开荒、非法占用河道、采砂采矿等行为;同时推进农业生产投入物质减量控害,逐步实现清洁化农业生产;实施农村生活污水处理工程,实现农村生活污水统一收集、自然净化,严格保障饮用水源生态安全。

贵阳市生态廊道网络包括现状廊道、潜在廊道和关键廊道，是连接相邻生态源地、实现生态流迁移/扩散的重要通道，保障区域生态安全的基本骨架。关键廊道可单独构成较低水平的安全格局，保证基本生态过程的进行，较好发挥生态系统服务功能；关键廊道与潜在廊道可共同构成高水平的安全格局，充分发挥生态系统的服务功能，保障贵阳市的生态安全。优先保护以河流为主的现有廊道，全面恢复河道植被，提高水环境质量，加快河流清淤，保障现状廊道通畅；重点建设贯穿南北的关键廊道，增加关键廊道上的林草种类，提高森林质量和生物多样性，同时加快关键廊道上少量现存非林、草地的退耕还林还草；针对潜在廊道，要因地制宜，有计划、有目标地逐步推进建设。由于生态廊道遍布各个区县，区县间应统一规划，协同发展，优先保障生态廊道的用地需求，避免人为活动切断生态廊道、孤立生态源地，保障生态廊道网络的完整性。未来贵阳市的区域开发，应以生态廊道为依托，发挥区位、资源和交通优势，建设连接各区县的生态旅游网络，将其建成具有国际影响力的避暑胜地及休闲旅游目的地，促进经济生态协调发展。

### 3.2 贵阳市区景观生态安全格局构建

贵阳市域的大部分生态源地和廊道都集中在北部地区，主要原因是采用统一标准进行生态源地和廊道识别。市区范围内的生态源地或廊道的生态重要性从整个市域来看相对较低，未能被识别成生态源地或廊道；但从人口分布最为密集的市区来看，其生态重要性更高、更为直接，尤其是如城市绿地、环城绿带等，对于维持市区的生态安全、满足市民的生态需求中发挥了更为重要的作用。因此，本文依据《贵阳市生态功能区划》（2009）确定的贵阳市建成区范围，向外缓冲 15km 进一步展开市区景观生态安全格局构建(图 4)，旨在充分保障贵阳市区生态安全。

贵阳市区景观生态安全格局主要分布于市区周边。其中，生态源地多分布于建城区外围，尤其是以百花湖、红枫湖、香纸沟、相思河风景区等风景名胜区为核心的花溪、观山湖、清镇、乌当等区较为集中，是市区生态安全的重要屏障。现状廊道由河流水系组成，呈网络状遍布市区。花溪湿地和南明河作为市区关键廊道纵贯市区南北，另外一条关键廊道环绕市区北部、西部和南部，贯穿乌当区的香纸沟和相思河、观山湖北部的百花湖和红枫湖到花溪区的青岩等重要生态保护区；潜在廊道主要分布于市区东部，基本呈南北走向，贯穿南明区和花溪区的东部郊区。

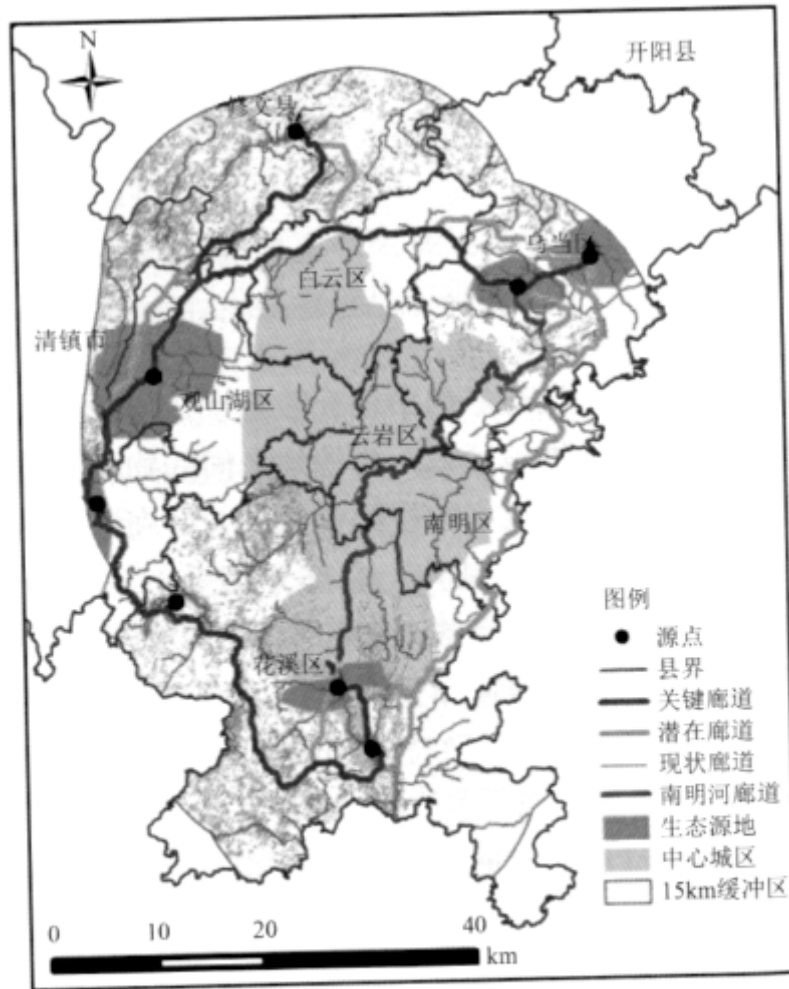


图4 贵阳市区景观生态安全格局  
Fig.4 Ecological Security Pattern of Guiyang Downtown

#### 4 结论与讨论

本文基于生态重要性、景观连通性和生态需求进行贵阳市生态源地综合识别；根据土地利用植被状况和人为干扰程度构建生态阻力面；基于最小累积阻力模型识别生态廊道网络，进而构建了贵阳市景观生态安全格局，得出结论如下：

贵阳市重要生态斑块占总面积的 66.39%，生态斑块的景观连通度普遍较好，生态需求较高的区域主要分布在人口密集的城市建成区周边。生态源地占总面积的 18.56%，集中分布在北部及西南部红枫湖、百花湖等区域。生态廊道网络遍布，潜在廊道和关键廊道 98%都为林地，主要分布于北部和西部生态环境较好的山地丘陵区。市 1X 生态源地集中在百花湖、红枫湖、香纸沟、相思河风景区等，花溪湿地和南明河作为市区关键廊道纵贯南北。

开阳和息烽作为生态源地的集中分布区，在维持生物多样性和景观格局健康、满足居民生态需求中发挥了重要的生态功能。作为重要的生态屏障，需加大生态整治力度，推进封山育林、荒山造林、退耕还林等生态建设工程的实施。红枫湖、百花湖既是生态源地，也是贵阳市重要的饮用水源地，要采取严格的水源地监管措施，保障饮用水源地的安全。生态廊道遍布全市，区县之间生态建设应统一规划，保障生态廊道的连通性。市区的生态建设尤其要保护花溪湿地和南明河，保护市区周边的自然保护区和风景名胜，发挥其重要的生态屏障功能和广大市民休闲放松的重要空间。

目前,景观生态安全格局构建的相关研究多直接采用已有的自然保护地(如自然保护区、风景名胜、森林公园、湿地公园等)作为生态源地构建生态安全格局,存在一定的局限性,难以全面、真实地揭示出区域生态安全的格局。本文综合考虑生态系统重要性、景观连通度和人类需求,既能准确识别现有自然保护地,又能识别具有重要生态意义的待建源地,有效提高了源地识别的准确性和全面性,据此构建的生态安全格局更为完整、更为系统。但是,由于全区范围内标准统一,导致部分生态价值绝对值较小,但对局部地区影响大的斑块未能识别为生态源地,安全格局过分偏重西南部地区。今后研究可尝试采用分区标准进行源地识别,充分考虑区域整体与局部的关系,为保障区域生态安全提供更加切实可行的科学指导。

#### 参考文献:

- [1] 肖宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3):354-358.
- [2] 蒙方军, 燕群, 向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J]. 中 W 沙漠, 2014, 34(2):590-595.
- [3] 刘洋, 蒙吉军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展. 生态学报, 2010, 30(24):6980-6989.
- [4] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1):8-15.
- [5] 韩文权, 常禹, 胡远满, 等. 景观格局优化研究进展[J]. 生态学报, 2005, 24(12):1487-1492.
- [6] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. 源汇景观理论及生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5):1444-1449.
- [7] 张玉虎, 于长青, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 风景生态安全格局构建方法研究——以北京妙峰山风景区为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3):420-425.
- [8] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原东北部湿地生态安全格局设计[J]. 生态学报, 2009, 29(3):1083-1090.
- [9] 吴建生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. 生态学报, 2013, 33(13):4125-4133.
- [10] 李晶, 蒙吉军, 毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建——以鄂尔多斯市准格尔旗为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(4):707-715.
- [11] 周锐, 王新军, 苏海龙, 等. 平顶山新生态用地的识别与安全格局构建[J]. 生态学报, 2015, 35(6):2003-2012.
- [12] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报, 2012, 67(7):878-888.
- [13] 张盼盼, 胡远满, 李秀珍, 等. 基于 GIS 的喀斯特高原山区石漠化景观格局变化分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):306-311.
- [14] 白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价[J]. 地理学报, 2009, 64(5):609-618.
- [15] 俞孔坚, 乔喆, 李迪华, 等. 基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8):1932-1939.
- [16] 王治江, 李培军, 万忠诚, 等. 辽宁省生态系统服务重要性评价[J]. 生态学报, 2010, 30(12):3980-3989.

2007, 26(10):1606-1610.

- [17] 谢高地, 侂春霞, 肖玉, 等. 青藏高原岛寒草地生态系统服务价值评估[J]. 山地学报, 2003, 21(1):50-55.
- [18] 唐秀美, 陈百明, 路庆斌, 等. 生态系统服务价值的生态 K 位修正方法——以北京市为例[J]. 生态学报, 2010, 30(13):3526-3535.
- [19] 胡专生, 洪伟, 吴承祯. 土地生态系统服务功能价值动态估算模型的改进与应用——以福州市为例[J]. 资源科学, 2013, 35(1):30-1.
- [20] 毕晓丽, 葛剑平. 基于 IGBP 土地盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估[J]. 山地学报, 2004, 22(1):48-53.
- [21] 许月卿, 蔡运龙. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀量计算及背脊空间分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5):50-54.
- [22] 曾凌云. 基于 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究——以贵州红枫湖流域为例[J]. 北京大学, 2008.
- [23] 香宝, 任华丽, 马广文, 等. 成渝经济区生态系统服务功能重要性评价[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7):722-730.
- [24] 谢花林, 李秀彬. 基于 GIS 的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴县长冈乡为例[J]. 生态学报, 2011, 31(1):230-238.
- [25] 梁友嘉, 徐中民. 基于 LUC 和夜间灯光辐射数据的张掖市市区人口空间分布建模[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4):999-1006.
- [26] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建[J]. 生态学报, 2008, 28(4):1711-1719.
- [27] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10):2863-2874.
- [28] 张玉虎, 李义禄, 贾海峰. 永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价[J]. 干旱区地理, 2013, 36(6):1049-1057.
- [29] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J]. 生态学报, 2011, 31(200928-5936).