

DOI: 10.20103/j.stxb.202407101614

李涛, 张宏, 徐鑫, 曹升亮, 张驰, 杨宏志. 青藏高原公路低生态影响评价与决策方法. 生态学报, 2025, 45(8): 3733-3749.

Li T, Zhang H, Xu X, Cao S L, Zhang C, Yang H Z. Research on evaluation and decision-making methods for low ecological impact of highways on the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3733-3749.

青藏高原公路低生态影响评价与决策方法

李 涛¹, 张 宏^{2,*}, 徐 鑫³, 曹升亮¹, 张 驰⁴, 杨宏志⁴

1 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075

2 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010020

3 内蒙古大学创业学院, 呼和浩特 010020

4 长安大学公路学院, 西安 710064

摘要:公路建设在推动区域经济社会发展的同时,也对生态环境产生了诸如生境干扰和水土流失加剧等负面影响。为在公路规划设计阶段进行源头生态保护,弥补路线方案决策时生态约束考虑不足和相近决策结果难抉择等问题,通过预测路域生态系统服务功能的变化,同时考虑路线方案占用生态敏感区的面积,建立了公路低生态影响评价指标体系,包括路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积、路线方案占用草地和林地面积、路域生境质量变化、路域水源涵养量变化、路域土壤侵蚀量变化。建立多维多规则云模型对路线方案进行评价和决策,并在久马高速上进行了实例应用,结果表明通过优化路线方案、以桥隧代路、完善边坡防护、复垦临时占地等方式能够降低路线工程对生态系统的扰动。研究提出了公路低生态影响评价与决策方法,有助于实现从事后恢复生态环境向事前规划和保护的转变,为公路设计优化、生态风险监测与管理、生态保护政策制定等方面提供决策支持,促进区域生态保护和高质量发展。

关键词:环境保护与可持续发展;公路生态影响;公路决策;生态系统服务功能;云模型

Research on evaluation and decision-making methods for low ecological impact of highways on the Qinghai-Tibet Plateau

LI Tao¹, ZHANG Hong^{2,*}, XU Xin³, CAO Shengliang¹, ZHANG Chi⁴, YANG Hongzhi⁴

1 China Communications Construction Company First Highway Consultants Company Limited, Xi'an 710075, China

2 Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China

3 Pioneer College, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China

4 School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: Highway construction is crucial for regional economic and social progress; yet, it presents considerable ecological challenges, including habitat disruption and exacerbated soil erosion. Conventional linear transportation infrastructure projects focus on evading ecologically sensitive zones, such as nature reserves, scenic areas, and watershed protection regions. Additionally, they enforce erosion control strategies, encompassing protective installations and drainage networks. These efforts are heavily dependent on standard regulations and the expertise of designers. A principal challenge is that prevailing standards tend to be principle-based, concentrating more on post-construction environmental rehabilitation than offering quantitative benchmarks and techniques for preemptive ecological preservation. To address these issues, this study introduces a set of evaluation indicators and a decision-making framework designed to assess the ecological impact of highways. The aim is to integrate proactive ecological conservation measures into the early planning and design stages of

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600103);国家自然科学基金项目(42407646);内蒙古自治区自然科学基金项目(2024QN05034);内蒙古大学青年学术人才科研启动项目(10000-23112101/068)

收稿日期:2024-07-10; 网络出版日期:2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongzhang@chd.edu.cn

highway projects. The evaluation indicator system innovatively accounts for not only the conventional metric of area encroachment in ecologically sensitive areas but also the highways' influence on ecosystem services, including habitat quality, water yield, and soil erosion. With a focus on the Qinghai-Tibet Plateau region, the effects of highways on permafrost are additionally a crucial factor to consider. Consequently, the evaluation system includes indicators like the extent of permafrost and medium-thickness seasonal frozen soil impacted by route choices, the regions of grassland and forestland encroached upon, alterations in habitat quality, water yield, and soil erosion within the zones influenced by roads. To tackle the challenges of integrating qualitative and quantitative attributes, ambiguous attribute grading thresholds, and complexities in decision-making based on analogous reasoning within the multi-attribute decision-making framework, a multi-dimensional and multi-rule cloud model has been developed. This model evaluates and decides on route options from a low ecological impact perspective, based on the established indicator system. It categorizes all evaluation indicators and results into three levels, calculates the corresponding numerical features of the cloud model, determines the membership degree and evaluation indicator score through rule generators, and finally calculates the total score of route options through weighted summation for ranking and decision-making. Subsequently, the evaluation and decision-making method for low ecological impact was applied in the planning of the Jiuma Expressway. The results indicate that the preliminary design phase and the detailed design phase for construction drawings of the Jiuma Expressway achieved scores of 0.489 and 0.483, respectively. It was observed that by optimizing route schemes, utilizing bridges and tunnels instead of embankments, enhancing slope protection, and reclaiming temporary land, the ecological disturbance caused by construction can be significantly reduced. The study proposes a method for evaluating and deciding on low ecological impact in highway construction, facilitating a shift from post-recovery to proactive planning and protection of the ecological environment. This method provides decision support for highway design optimization, ecological risk monitoring and management, and ecological protection policy-making, thereby fostering regional ecological protection and sustainable development.

Key Words: environmental protection and sustainable development; highway ecological impacts; highway decision-making; ecosystem services; cloud model

随着《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》的实施,我国对线性交通基础设施建设的重视和投资程度进一步增加,同时,对构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通体系、促进交通基础设施与生态空间协调、推进生态公路和铁路建设以及绿色低碳发展提出了更高的要求。预计到2030年,全国公路里程将达到615万km,约有10%的新增铁路和公路里程将位于青藏高原、黄土高原、西北干旱半干旱区、北方风沙区、西南石漠化区等生态环境敏感地区。这些地区受高寒、强风、干旱、缺氧、强辐射、低热量等自然特征的影响,以森林、草甸、草原、荒漠和半荒漠地带为主,其生态环境敏感脆弱且自我调节能力低^[1],易受人类工程活动干扰且不易恢复,线性交通基础设施建设与生态环保之间的矛盾尤为突出^[2]。

长期以来,在倡导生态优先和绿色发展的大背景下,生态公路建设始终是备受关注的研究领域。在公路施工和运维阶段,针对施工工艺优化^[3-6]、环保材料选用^[7-8]、交通环境监测^[9-11]等方面的研究已取得显著成就。然而,在公路规划设计阶段,对生态环保的考虑严重依赖标准规范和设计人员的经验知识,通过绕避自然保护区、风景名胜区、水源保护区等生态敏感区协调公路建设与生态环保,采用挡护工程和排水措施等手段进行水土保持,在源头生态环保方面较宏观且缺乏量化指标和方法。

传统的公路评价与决策方法包括案例分析法、数学模型驱动法、数据驱动法和空间建模法。案例分析法通过对具体路线方案的设计优化过程进行分析,总结出定性的选线原则,应用范围比较局限。数学模型驱动法是在构建评价指标体系并计算指标权重的基础上建立数学模型定量评价路线方案,包括灰色关联法、层次分析法、模糊综合评价法、多元回归分析法、频率比法、信息量模型、可拓学等^[12-14]。数据驱动法是在多维多约束条件下对公路平面和纵断面进行优化设计,包括神经网络模型、决策树法、随机森林模型、遗传算法、最短

路径算法、支持向量机模型、贝叶斯模型等^[15-17]。空间建模法通过考虑影响因素的地理空间分布评估工程建设区域的生态环境现状,包括遥感建模、图形叠置法、热点分析、证据权法、压力-状态-响应模型等^[18-20]。上述数学模型驱动法、数据驱动法和空间建模法主要用于评价优化路线方案或评估项目区域生态本底^[21-23];其中数学模型驱动法在实际应用时以考虑经济和安全为主,对于生态环保方面的考虑比较局限;数据驱动法在建模时需要广泛收集数据并给出初始方案分布,不适用于观测数据不完整、数据获取不易的青藏高原等地区;空间建模法通常考虑自然气候、占地类型和面积等因素,忽略了公路等级和结构等因素对生态环境的影响。

此外,公路评价与决策是迭代的过程,其本质是多属性决策问题,通常存在定性和定量属性糅杂、属性分级界限不明确、相近推理结果难抉择等问题,由中国工程院院士李德毅教授提出的云模型为处理这些不确定性问题提供了一种有效的数学工具。云模型最初用于模糊概念表达,随后用于多属性决策、风险评估、预测建模等多个领域,通过与其他数学工具和人工智能技术的结合,如模糊逻辑、神经网络和机器学习,为大数据分析提供新的解决方案^[24-25]。云模型通过云滴的分布来量化和表达方案的不确定性属性,支持多属性决策,能够综合考虑多个属性或标准,提供一个综合的评价结果,其灵活性还允许在决策过程中动态调整参数,以适应环境或条件的变化,为决策者提供了一种直观、灵活的评价方法^[26-27]。

基于此,为了在公路规划设计阶段进行源头生态保护,亟需研究公路低生态影响评价与决策方法,即生态选线方法,旨在通过量化评估不同路线方案对生态环境的影响,确定低生态影响的最佳路线。本研究提出一种基于多维多规则云模型的公路低生态影响评价与决策方法,主要学术贡献包括:①在公路评价与决策过程中,综合考虑公路等级、构造物、路线长度、路基高度、边坡防护等公路特征以及自然环境因素,预测路线方案建成通车后对生态系统服务功能的影响,同时考虑路线方案占用生态敏感区的面积,从生态环保角度建立评价指标体系;②建立多维多规则云模型对路线方案进行评价和决策,通过生成云滴来表示每个评价指标的不确定性程度,将数学模型驱动法和空间建模法结合,提高评价的客观性,从而帮助决策者做出更加合理的选择。

1 数据来源

公路低生态影响评价与决策中涉及的数据主要包括公路设计方案数据、与生态环境相关的地形地貌、气象水文和土壤植被数据等,具体数据类型及其来源如表 1 所示。

本研究中涉及的公路设计方案及其说明数据来源于中交第一公路勘察设计院有限公司,土地利用和覆盖、高程、水系、年降水量、年平均气温等栅格和要素数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,年平均日最高温、年平均日最低温、月降水量等栅格数据来源于数字地球开放平台,植物利用水分含量、土壤组成等栅格和文本数据来源于世界土壤数据库和实地勘测,植被蒸散系数、植被覆盖和作物管理因子、水土保持措施因子等表格数据通过文献综述和实地勘测确定。其中,土壤组成等文本数据可以通过 GIS 的点要素转栅格数据、创建和编辑栅格属性表、插值等工具处理成栅格数据;植被蒸散系数、植被覆盖和作物管理因子、水土保持措施因子等表格数据可以通过 GIS 的编辑属性表或属性表连接等工具处理成栅格数据。在此基础上,本研究基于 GIS 的缓冲区分析、裁剪、重分类和栅格计算等空间数据处理和空间分析技术,计算公路低生态影响评价指标的值并进行公路评价与决策,所涉及栅格数据的空间分辨率为 1km。

2 研究方法

2.1 公路低生态影响评价指标体系

公路勘察设计的通常包括工程项目可行性研究、初步设计、施工图设计三个阶段。在工程项目可行性研究阶段,路线方案评价指标通常包含地形地质、工程规模、环境影响、在地方经济中的作用等;在初步设计和施工图设计阶段,路线方案评价指标通常包含技术经济、地形地质、线形协调性、交通安全等。这些评价指标主要考虑占用生态敏感区的面积,以及公路本身的几何设计和构造物设计,较少考虑路线方案建成通车后对生态

环境的影响。青藏高原地区地质条件复杂,公路建设不可避免地会破坏地表土壤和植被,造成区域景观破碎、水土流失、动植物多样性下降、冻土退化等一系列生态环境问题,本研究通过预测路线方案建成通车后对生态系统服务功能的影响,同时考虑路线方案占用生态敏感区的面积,建立公路低生态影响评价指标体系,包括路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积(C_1)、路线方案占用草地和林地面积(C_2)、路域生境质量变化(C_3)、路域水源涵养量变化(C_4)、路域土壤侵蚀量变化(C_5)。

表 1 数据类型及其来源
Table 1 Data types and their sources

数据/参数 Data/parameters	数据类型 Data types	数据格式 Data format	数据来源 Data sources
公路设计方案(包含地理位置、几何设计、路桥隧构造物设计等) Highway design scheme	图纸/线要素	dwg/kml/shp	公路勘察设计单位/OpenStreetMap (https://www.openhistoricalmap.org)
公路设计方案说明(包含公路等级、周边生态敏感区、水土保持措施等) Highway design scheme specification	文本	PDF/docx	公路勘察设计单位/互联网开放获取资源
土地利用和覆盖 Land use and cover	栅格	grid/tif	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)/遥感影像解译
高程 Elevation	栅格	grid/tif	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)/遥感影像解译
水系 Watersheds	线要素	kml/shp	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)/遥感影像解译
年降水量 Annual mean precipitation	栅格	grid/tif	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)/遥感影像解译
年平均气温 Annual mean temperature	栅格	grid/tif	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)/遥感影像解译
年平均日最高温 Annual average daily maximum temperature	栅格/表格	grid/tif/xlsx	中国气象数据网(http://data.cma.cn/) 数字地球开放平台 (https://open.geovisearth.com/)/ 地面观测站/遥感影像解译
年平均日最低温 Annual average daily minimum temperature	栅格/表格	grid/tif/xlsx	中国气象数据网(http://data.cma.cn/) 数字地球开放平台 (https://open.geovisearth.com/)/ 地面观测站/遥感影像解译
月降水量 Monthly precipitation	栅格/表格	grid/tif/xlsx	中国气象数据网(http://data.cma.cn/) 数字地球 开放平台(https://open.geovisearth.com/)/地面观 测站/遥感影像解译
植物利用水分含量 Plant available water content	栅格/文本	grid/tif/ PDF/docx	世界土壤数据库(http://www.iiasa.ac.at/Research/ LUC/External-World-soil-database/HTML/)/土 壤 采 样和分析
土壤组成 Soil types	栅格/文本	grid/tif/ PDF/docx	世界土壤数据库(http://www.iiasa.ac.at/Research/ LUC/External-World-soil-database/HTML/)/土 壤 采 样和分析
植被蒸散系数 Vegetation evapotranspiration coefficient	文本/表格	PDF/docx/ xlsx/csv	文献综述,详见 2.1 节
植被覆盖和作物管理因子 Crop management factor	文本/表格	PDF/docx/ xlsx/csv	文献综述,详见 2.1 节
水土保持措施因子 Support practice factor	文本/表格	PDF/docx/ xlsx/csv	文献综述,详见 2.1 节

2.1.1 路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积(C_1)

我国分布的冻土类型主要包括连续多年冻土、高山冻土、中厚层季节性冻土(>1m)、薄层季节性冻土(<1m)和短时冻土,当路线方案经过连续多年冻土、高山冻土和中厚层季节性冻土(>1m)时,更易引发冻土退化、热融湖塘、融沉、冻胀等冻土病害,导致意外的环境或工程灾害。因此,本研究以路线方案经过多年冻土和

中厚层季节性冻土的面积为公路低生态影响评价指标。

2.1.2 路线方案占用草地和林地面积(C_2)

按照国家土地利用分类方法,结合“中国 20 世纪土地利用/覆被变化时空平台”建立的土地利用分类系统,将土地利用类型归结为 6 个一级分类(耕地;林地;草地;水域;城乡、工矿、居民用地;未利用土地)和 25 个二级分类^[28]。本研究采用的土地利用数据遵循上述分类体系,因此路线方案占用草地和林地面积指标中的草地和林地均为一级分类,其中草地包括高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地,林地包括有林地、灌木林、疏林地和其他林地。

2.1.3 路域生境质量变化(C_3)

路域生境质量变化指标通过对比路线方案规划年与基准年(尚未规划路线方案且土地利用较稳定的年份)的路域生境质量评估结果得到。对于路域生境质量评估,首先计算路域内每个栅格单元受到的总威胁水平。该威胁水平主要取决于各威胁因子的影响权重、影响距离和空间分布强度,以及生境对威胁因子的敏感性和生境受到的保护程度,见式(1);然后采用半饱和函数将每个栅格单元的总威胁水平转化为生境质量^[28-29],见式(2)。该函数仅仅改变栅格值的扩散和居中趋势,值越高表明生境质量越高。

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y \exp \left(- \frac{2.99 d_{xy}}{d_{r\max}} \right) \beta_x S_{jr} \quad (1)$$

式中, D_{xj} 表示生境 j 的栅格 x 受到的总威胁水平; w_r 表示威胁因子 r 的权重; r_y 表示威胁 r 在栅格 y 处的强度,取值为 0 和 1,分别表示该栅格缺失和存在威胁; d_{xy} 表示生境栅格 x 和威胁栅格 y 的线性距离; $d_{r\max}$ 是威胁 r 的最大影响距离; β_x 表示生境栅格 x 受到的保护程度,取值范围为 0—1,值越大表示生境越不容易侵入,可通过研究区域设立的自然保护区范围和等级确定; S_{jr} 表示生境 j 对威胁 r 的敏感性,取值范围为 0—1,值越大表示生境越容易受威胁因子的影响导致其退化。

$$HQ_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (2)$$

式中, HQ_{xj} 表示生境 j 的栅格 x 的质量; H_j 表示生境 j 的适宜性,取值范围为 0—1,0 表示非生境,1 表示生境适宜性最高; $Z=2.5$; k 为比例因子,初始值为 0.5,实际取值为各栅格单元受到的总威胁水平的最大值^[30]。

公路路基段会造成永久性的生物栖息地丧失、景观联通性下降和生境质量下降,而桥涵和隧道段对生境质量的影响较小,后期通过生态恢复也可以减小影响。此外,不同等级的公路对生境质量的影响也不同,高等级公路对生境的占用面积较大,其全部控制出入的交通组织方式对景观联通性的影响也较大;低等级公路尽管没有全部控制出入,但是其里程较长,对景观破碎化的影响较大。因此,进行路域生境质量评估时,威胁因子除考虑传统的耕地和城市用地外,将重点考虑高速公路路基段、一级公路路基段、二级公路路基段、桥隧段,威胁因子的空间分布强度(栅格图)可从现状土地利用栅格图和区域公路工程概况中获取。威胁因子的影响权重和最大影响距离通过文献综述获得,生境及其适宜性和生境对威胁的敏感性依据研究区域生物概况确定^[31-34]。各威胁因子及其影响权重和最大影响距离如表 2 所示,各生境及其适宜性如表 3 所示。

表 2 威胁因子及其影响权重和最大影响距离

Table 2 Threats and their impact weights and maximum impact distances

威胁因子 Threats	影响权重 Weights	最大影响距离/km Maximum impact distances
高速公路路基段 Roadbed sections of expressways	0.95	4
一级公路路基段 Roadbed sections of first-class highways	0.85	3
二级公路路基段 Roadbed sections of second-class highways	0.75	2
公路桥隧段 Bridge and tunnel sections of all roads	0.25	1
耕地 Farmland	0.8	4
城市用地 Built-up land	1	5

表 3 生境及其适宜性

Table 3 Habitats and their suitability

生境编号 Habitat number	生境 Habitat	适宜性 Habitat suitability	生境编号 Habitat number	生境 Habitat	适宜性 Habitat suitability
11	水田 Paddy field	0.4	44	永久性冰川雪地 Permanent glacier snow	0
12	旱地 Dry land	0.3	45	滩地 Tidal flat	0.2
21	有林地 Woodland	1	51	城镇用地 Urban land	0
22	灌木林 Shrub	1	52	农村居民点 Rural settlement	0
23	疏林地 Sparse woodland	1	53	其它建设用地 Other construction land	0
24	其他林地 Other woodland	0.8	530	高速公路 Expressway	0
31	高覆盖度草地 High coverage pastureland	1	531	一级公路 First-class highway	0
32	中覆盖度草地 Medium coverage pastureland	0.7	532	二级公路 Second-class highway	0
33	低覆盖度草地 Low coverage pastureland	0.4	61	沙地 Sandy land	0
41	河渠 River channel	0.7	62	沼泽地 Wetland	1
42	湖泊 Lake	0.8	63	裸土地 Bare land	0.2
43	水库坑塘 Reservoir pit	0.7	64	裸岩石质地 Bare rock texture	0.2

2.1.4 路域水源涵养量变化(C₄)

路域水源涵养量变化指标通过对比路线方案规划年与基准年(尚未规划路线方案且土地利用较稳定的年份)的路域产水量得到。基于 Budyko 水热耦合平衡假设估算栅格单元的产水量,即降水量减去实际蒸散发量 $WY(x)^{[35]}$,见式(3)。

$$WY(x) = P(x) - AET(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \tag{3}$$

式中,AET(x)和P(x)分别表示栅格单元x的年实际蒸散量(mm)和年降雨量(mm),对于耕地、林地、草地等土地利用类型,AET(x)/P(x)可用式(4)计算。对于水域、城市用地、未利用土地和公路用地等土地利用类型,其栅格单元的年实际蒸散量AET(x)采用式(5)计算。

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{K_c(l_x) \times ET_0(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{K_c(l_x) \times ET_0(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \tag{4}$$

式中, ω 表示与土壤有效含水量(AWC)(可从HWSD的土壤数据集获取)、降雨量及其季节分布相关的非物理参数,可采用Donohue等提出的公式计算^[36];ET₀(x)表示栅格单元x的参考作物(苜蓿)蒸散量(mm),受天文辐射量、年平均日最高温和最低温、月均降水量影响,采用改进Hargreaves函数计算^[37];K_c(l_x)为修正系数,可将参考作物蒸散量修正为特定作物或植被类型的蒸散量,表征栅格单元x的土地利用类型的植被性质。

$$AET(x) = \min(K_c(l_x) \times ET_0(x), P(x)) \tag{5}$$

公路建设和运营过程中,需要对地表进行大量的开挖、破碎和压实等工程活动,这些活动破坏了土壤结构和土壤孔隙空间,使得土壤的渗透性和保水性降低。此外,路基段的土壤表层被厚厚的沥青和水泥路面覆盖,也阻碍了土壤的水分渗透和蒸发。因此,本研究将公路用地近似于无植被覆盖的土地,其植被蒸散系数介于0.001—0.3^[38],土壤有效含水量为修建公路前的0.5倍^[39]。

2.1.5 路域土壤侵蚀量变化(C₅)

路域土壤侵蚀量变化指标通过对比路线方案规划年与基准年(尚未规划路线方案且土地利用较稳定的年份)的路域土壤侵蚀量得到。基于修正通用土壤流失方程估计栅格单元的年土壤侵蚀总量,见式(6)。

$$SE = R \times K \times LS \times C \times P \tag{6}$$

式中,R、K、LS、C、P分别代表降水侵蚀性因子(MJ mm hm⁻² h⁻¹)、土壤可侵蚀性因子(t hm² h MJ hm⁻² mm⁻¹)、坡度坡长因子、植被覆盖和作物管理因子、水土保持措施因子。

降水侵蚀性因子 R 与月平均降水量和年平均降水量有关;土壤可侵蚀性因子 K 基于土壤组成数据计算^[40]。坡度坡长因子采用 Desmet 和 Govers 提出的二维地表计算方法计算^[41]。植被覆盖和作物管理因子 C 指有植被覆盖或农作物管理的土地与相同条件下空闲土地的土壤侵蚀量之比,取值范围为 0—1。水土保持措施因子 P 指采取和不采取水土保持措施的土地的土壤侵蚀量之比,取值范围为 0—1。

公路主体工程和取弃土场等临时性辅助工程会破坏地表原有的土壤和植被,改变地表起伏度,而且路面的透水性较差,会增加径流量和雨水冲刷力,导致道路影响区内土壤侵蚀量增加。因此, LS 因子依据路基高程计算, C 、 P 因子取值分别为 0.2 和 0.9^[42—43]。

2.2 基于多维多规则云模型的公路低生态影响评价与决策方法

云模型可以表征定性概念与定量表达之间过渡的不确定性。对于集合 U 内的一组随机数 $y_i \sim N(Ex, En'^2)$, 其中 $En' \sim N(En, He^2)$, 可用定性概念 $C(Ex, En, He)$ 表达, 三个数字特征分别表示云滴的期望、跨度和离散度^[44—45], 随机数 y_i 对 C 的隶属度 $\mu(y_i) \in [0, 1] = \exp[-(y_i - Ex)^2 / (2En'^2)]$ 分布称为云, 每一个随机数与其对定性概念的隶属度组合 $(y_i, \mu(y_i))$ 称为云滴(图 1)。对于区间型随机数, 其云模型的期望 Ex 和熵 En 采用式(7)和(8)计算^[46], 超熵 He 可依据熵的离散程度进行定义。由定性概念 $C(Ex, En, He)$ 和定量值 y_i 可以生成隶属度 $\mu(y_i)$ (前件云发生器), 由定性概念 $C(Ex, En, He)$ 和隶属度 $\mu(y_i)$ 可以生成定量值 y_i (后件云发生器), 每次生成的隶属度和定量值均具有不确定性。

$$Ex = \frac{U_{\min} + U_{\max}}{2} \quad (7)$$

$$En = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{6} \quad (8)$$

基于多维多规则云模型的公路低生态影响评价与决策是在确定评价指标和评价结果云模型的基础上, 将多维评价指标云模型及评价指标得分输入前件云发生器中计算得到多维隶属度, 然后将对应的评价结果云模型和隶属度输入后件云发生器中计算得到多维评价指标得分组成的, 并基于多维隶属度对评价指标得分加权平均, 从而计算得到方案最终得分, 在此基础上对路线方案进行选择决策(图 2), 具体步骤如下。

(1) 为公路低生态影响评价指标 C_i 划分等级 m ($m=1, 2, 3$) 并确定每个等级的云模型数字特征 C_{im} ($Ex_{im}, En_{im}, He_{im}$)。

公路低生态影响评价与决策通常针对局部路段或单个标段, 其路线长度一般小于 300km, 因此采用等间距法将路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积(C_1)、路线方案占用草地和林地面积(C_2)指标分成三级, 不同等级经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积或占用草地和林地面积分别为 0—150km²、100—250km²、200—300km²。由于不同路线方案对生境质量、水源涵养量、土壤侵蚀量的影响强度不同, 因此将路域生境质量变化(C_3)、路域水源涵养量变化(C_4)、路域土壤侵蚀量变化(C_5)指标进行归一化, 采用等间距法将归一化变化值分为三级, 不同等级取值范围分别为 0—0.4、0.3—0.7、0.6—1.0。

在确定评价指标分级的基础上, 设超熵 He 介于 0.001—0.1, 依据式(7)和(8)计算每个等级的云模型数字特征(表 4)。

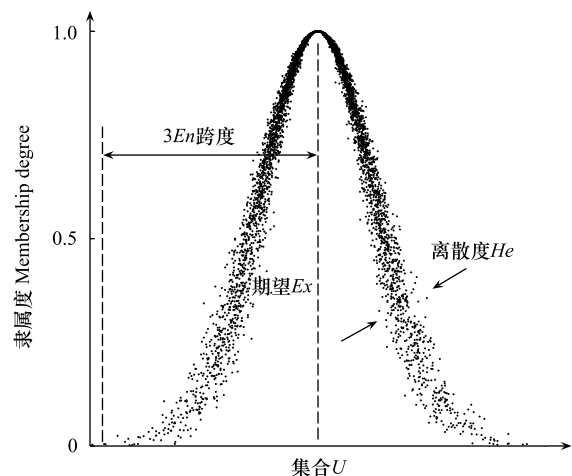


图 1 云模型数字特征

Fig.1 Numerical features of the cloud model

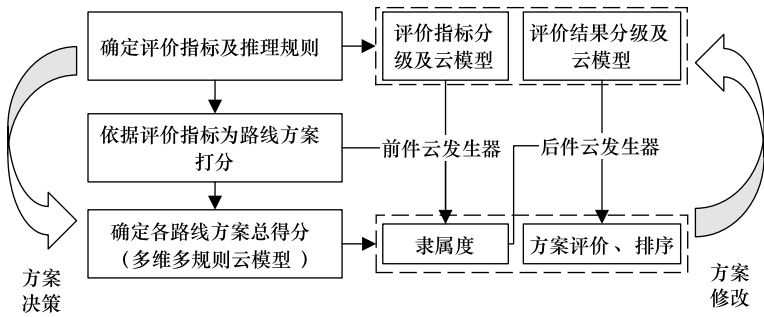


图2 基于云模型的公路低生态影响评价与决策过程

Fig.2 Low ecological impact evaluation and decision-making process for highways based on cloud model

表4 公路低生态影响评价指标分级及其云模型数字特征

Table 4 Classification of low ecological impact evaluation index of highways and numerical features of their cloud models

评价指标 Evaluation indicators	分级 Grading	云模型数字特征 Cloud model numerical features
C_1 :路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积/ km^2 The area of permafrost and medium-thickness seasonal frozen soil affected by route options	一级[0, 150]	$C_{11}(75, 25, 0.1)$
	二级[100, 250]	$C_{12}(175, 25, 0.1)$
	三级[200, 300]	$C_{13}(250, 16.7, 0.1)$
C_2 :路线方案占用草地和林地面积/ km^2 The area of grassland and woodland occupied	一级[0, 150]	$C_{21}(75, 25, 0.1)$
	二级[100, 250]	$C_{22}(175, 25, 0.1)$
	三级[200, 300]	$C_{23}(250, 16.7, 0.1)$
C_3 :路域生境质量变化 Changes in habitat quality within the road effect zones	一级[0, 0.4]	$C_{31}(0.2, 0.07, 0.05)$
	二级[0.3, 0.7]	$C_{32}(0.5, 0.07, 0.05)$
	三级[0.6, 1.0]	$C_{33}(0.8, 0.07, 0.05)$
C_4 :路域水源涵养量变化 Changes in water yield within the road effect zones	一级[0, 0.4]	$C_{41}(0.2, 0.07, 0.05)$
	二级[0.3, 0.7]	$C_{42}(0.5, 0.07, 0.05)$
	三级[0.6, 1.0]	$C_{43}(0.8, 0.07, 0.05)$
C_5 :路域土壤侵蚀量变化 Changes in soil erosion within the road effect zones	一级[0, 0.4]	$C_{51}(0.2, 0.07, 0.05)$
	二级[0.3, 0.7]	$C_{52}(0.5, 0.07, 0.05)$
	三级[0.6, 1.0]	$C_{53}(0.8, 0.07, 0.05)$

(2)为路线方案评价结果划分等级 m ($m = 1, 2, 3$)并确定每个等级的云模型数字特征 $C_m(Ex_m, En_m, He_m)$ 。

将路线方案评价结果用0—1之间的数字定量表示,值越低表示路线方案对生态环境的影响越小,采用等间距法将评价结果分为三级,不同等级取值范围分别为0—0.4、0.3—0.7、0.6—1.0,设超熵 He 为0.05,依据式(7)和(8)计算每个等级的云模型数字特征(表5)。

(3)为评价指标和评价结果建立规则发生器。

上述5类评价指标中,路域生境质量变化(C_3)和路域水源涵养量变化(C_4)为效益型指标,指标等级越高表示生境质量提升或水源涵养量增加,即路线方案对生态环境的影响越小,因此一、二、三级指标对应的路线方案评价结果分别为一般、良、优。路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积(C_1)、路线方案占用草地和林地面积(C_2)和路域土壤侵蚀量变化(C_5)为成本型指标,指标等级越高表示经过多年冻土和中厚层季

表5 路线方案评价结果分级及其云模型数字特征

Table 5 Classification of route scheme evaluation results and numerical features of their cloud models

分级 Grading	云模型数字特征 Cloud model numerical features
优 [0, 0.4] Excellent	$C_1(0.2, 0.07, 0.05)$
良 [0.3, 0.7] Good	$C_2(0.5, 0.07, 0.05)$
一般 [0.6, 1.0] Average	$C_3(0.8, 0.07, 0.05)$

节性冻土的面积增加、占用草地和林地面积增加或土壤侵蚀量增加,即路线方案对生态环境的影响越大,因此一、二、三级指标对应的路线方案评价结果分别为优、良、一般。

(4) 依据评价指标分别对路线方案进行定量和定性评价,并得到评价指标得分 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 。

(5) 将多维评价指标云模型 $C_{im}(Ex_{im}, En_{im}, He_{im})$ 和评价指标得分 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 输入前件云发生器 CG_i 中计算得到多维隶属度 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, 见式(9)。

$$\mu_i = \exp[-(y_i - Ex_{im})^2 / (2En_{im}^2)] \quad (9)$$

(6) 依据步骤(3)中推理规则选择评价结果云模型 $C_m(Ex_m, En_m, He_m)$, 并将其和多维隶属度 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 输入后件云发生器 CG_i^{-1} 中计算得到各评价指标得分 $s_1, s_2, \dots, s_n$, 在计算加权评价指标得分 $s'_1, s'_2, \dots, s'_n$ 的基础上得到路线方案的最终得分 SS (图 3), 见式(10)至式(11)。

$$s_i = \begin{cases} \text{若 } y_i > Ex_{im}, \text{ 则 } s_i = Ex_m + En_m' \sqrt{-2 \ln \mu_i} \\ \text{若 } y_i \leq Ex_{im}, \text{ 则 } s_i = Ex_m - En_m' \sqrt{-2 \ln \mu_i} \end{cases} \quad (10)$$

$$SS = \sum_{i=1}^n s'_i \quad (11)$$

3 案例分析与讨论

3.1 工程概况

G0615 线久治至马尔康高速公路(简称久马高速)位于川西高原的阿坝羌族藏族自治州, 全线海拔 3000m 以上, 山地向高原的过渡地带, 起点位于青海省久治县, 与花石峡至久治段高速公路相接, 在阿坝县境内与 G347 处于同一走廊, 路线南行, 穿过牧场, 沿棱磨河南下, 在王家寨处与在建汶马高速相接(图 4)。A1 标段路段全长约 160km, 双向四车道, 设计速度和路基宽度分别为 100km/h、26m, 桥隧比例 32.89%, 总投资约 86.585 亿元。

沿线自然环境秀美, 生态环境独特但脆弱, 特别是路线需经过四川阿坝多美林卡国家湿地公园、莲宝叶则景区规划区及世外桃源神座景区, 社会关注度高、环保景观重要。沿线河流水系纵横交错, 支流发达, 地下水

发育。项目为高寒高海拔地区高速公路, 项目建设面临“高寒霜冻、季节性冻土”等技术性难题。因此, 本研究通过预测路线方案建成后对生态敏感区占用和对生态系统服务功能影响程度, 从低生态影响角度对久马高速 A1 标段初步设计阶段和施工图设计阶段的路线方案进行评价。

3.2 路线方案占用生态敏感区的面积

初步设计阶段路线方案占用草地和林地面积约 79km², 主要分布在起点至莲宝叶则景区、神座景区至终点路段, 约占整个占地面积的 50.64%。施工图设计阶段路线方案占用草地和林地面积约 97km², 主要分布在莲宝叶则景区至终点路段, 约占整个占地面积的 60.25%。项目全域广泛分布着中厚层季节性冻土, 因此初步设计和施工图设计路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积与其占地面积相同, 分别为 156km² 和 161km², 如图 5 所。结果表明: 相比初步设计阶段路线方案, 施工图设计阶段路线方案里程增加, 在草地和林地的占用面积以及冻土区域的穿越面积上有所增加, 因此在设计中需要注意冻土的保护和利用, 综合考虑环境保护和工程稳定性的需求。

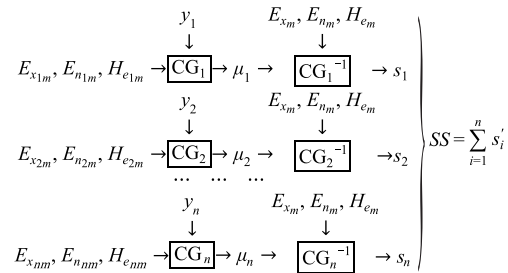


图 3 基于多维多规则云模型计算路线方案得分的流程图

Fig.3 Flowchart of calculating route scheme scores based on multi-dimensional and multi-rule cloud model

$Ex_{im}, En_{im}, He_{im}$ 为评价指标的云模型数字特征; y_i 为评价指标的输入值; CG_i, CG_i^{-1} 分别为前件云发生器和后件云发生器; μ_i 为评价指标输入值的隶属度; Ex_m, En_m, He_m 为评价结果的云模型数字特征; s_i, s'_i 分别为评价指标的输出得分及其加权值; SS 为最终评价结果得分(i 取值为 1、2、……、 n)

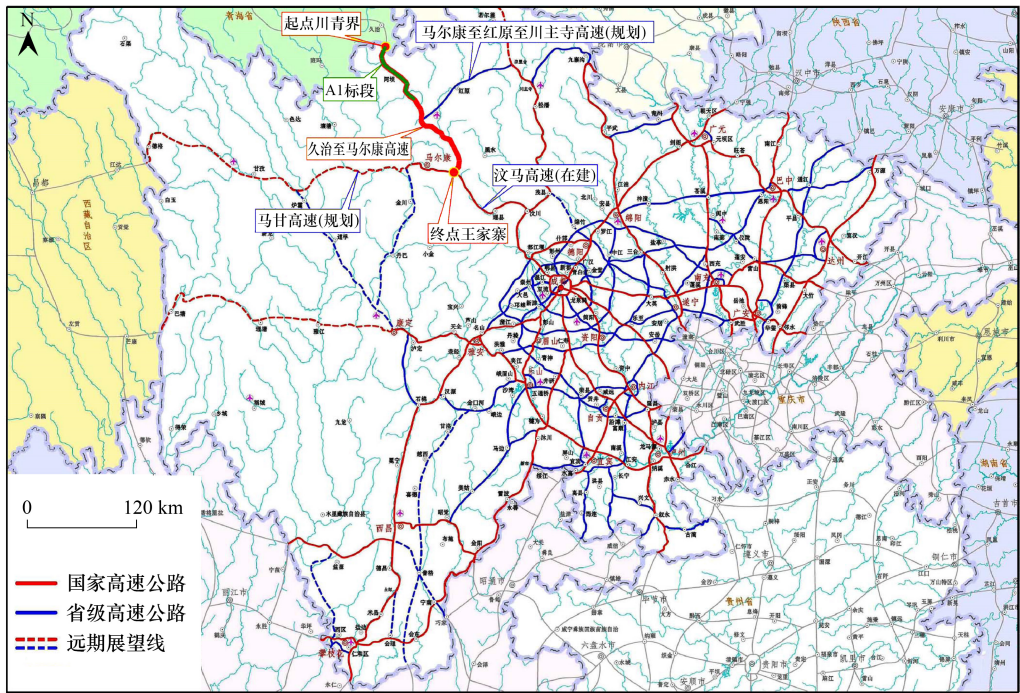


图 4 项目地理位置图

Fig.4 Geographical location map of the project

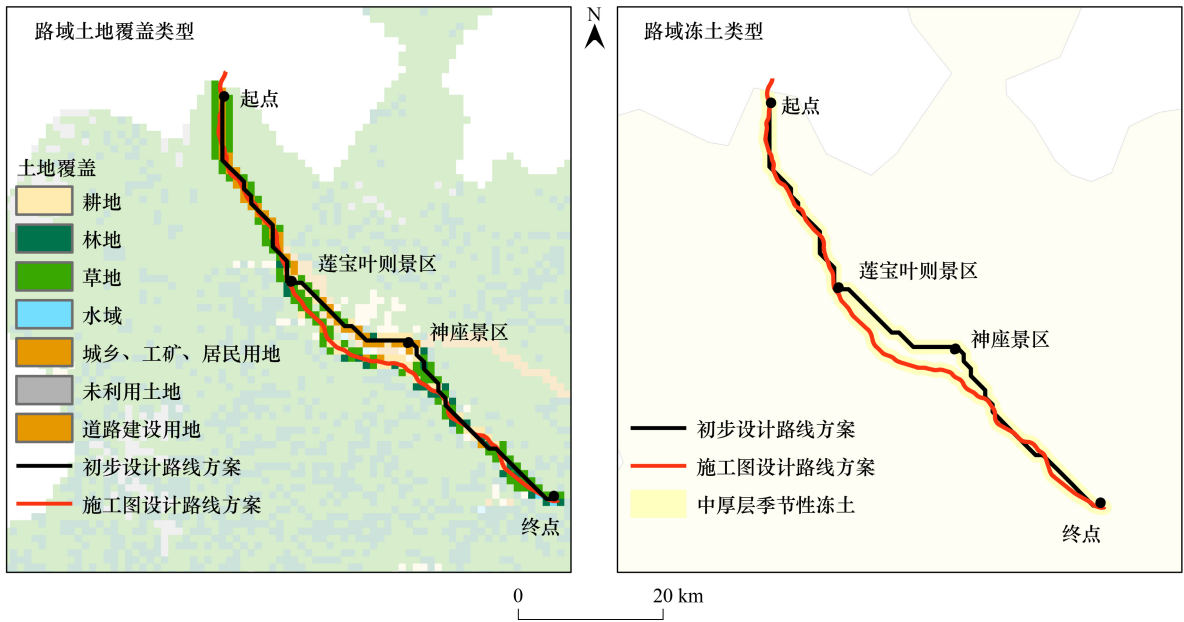


图 5 久马高速路域土地覆盖类型和冻土类型

Fig.5 Land cover and frozen soil of the roadway area in the Jiuma Expressway

3.3 路域生境质量评估

基于 2.1.3 节提出的计算公式,预测路线方案建成后的路域生境质量,如图 6 所示,初步设计和施工图设计路线方案的平均生境质量分别为 0.408 和 0.419;在莲宝叶则景区至神座景区路段的生境质量较差(<0.2),主要原因是景区附近生境对威胁的敏感性较高;终点附近为隧道段,建成通车后对生境质量影响较小,因此其

生境质量较优(>0.6)。结果表明:通过路线方案优化,施工图设计阶段在整体上对生境质量的保护优于初步设计阶段;在景区等生态敏感区,应采取积极的生态补偿措施,如生态修复、建设生态廊道等,以减轻对生境质量的负面影响。

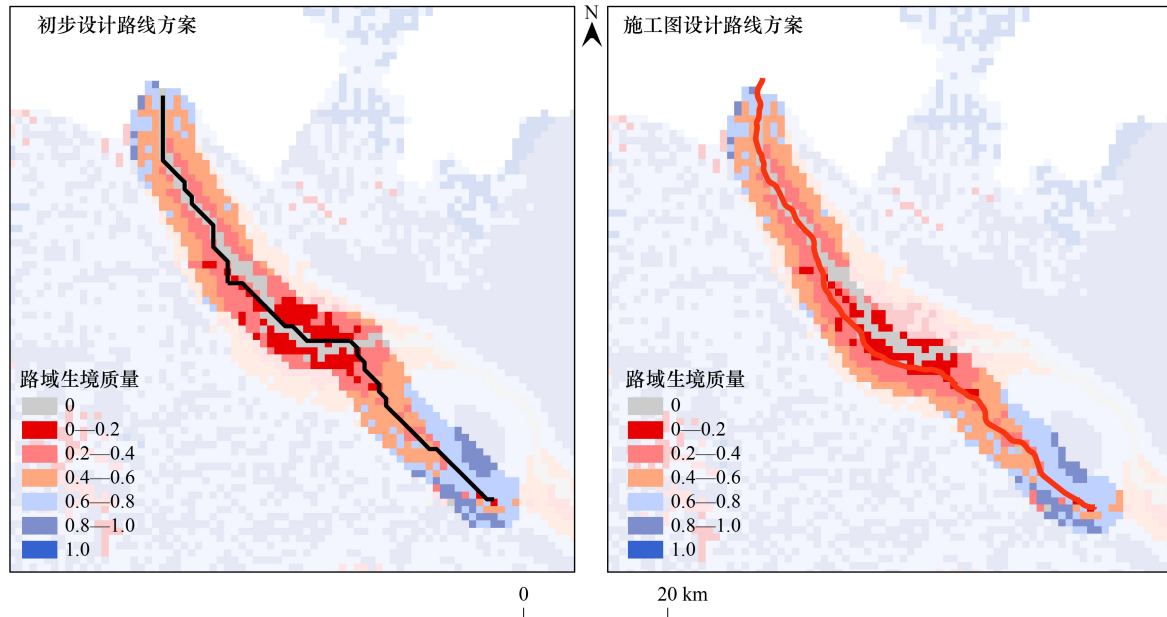


图 6 久马高速路域生境质量

Fig.6 Habitat quality of the roadway area in the Jiuma Expressway

3.4 路域水源涵养量评估

基于 2.1.4 节提出的计算公式,预测路线方案建成后的路域水源涵养量(图 7),结果表明:初步设计和施工图设计路线方案的平均水源涵养量分别为 583.429mm 和 587.894mm。初步设计路线方案在起点段(K0—K6)、神座景区至终点路段的水源涵养量较高,施工图设计路线方案在神座景区至终点路段的水源涵养量较高,主要原因是考虑起点段初步设计线位受阴坡影响,冬雨季节行车安全性差,在施工图设计阶段将该段路线调整至 G347 右侧、若果囊河西岸布线。

3.5 路域土壤侵蚀量评估

基于 2.1.5 节提出的计算公式,预测路线方案建成后的路域土壤侵蚀量(图 8),结果表明:初步设计和施工图设计路线方案的平均土壤侵蚀量分别为 10918.600t/ha 和 6703.990t/ha。相比较初步设计路线方案,施工图设计路线方案在神座景区附近的土壤侵蚀量减少,主要原因是施工图设计阶段完善了神座隧道弃渣场的排水、防护和植被的恢复设计,增强了弃渣场的稳定性,加强了弃渣场上表面的复垦工作。

3.6 路线方案评价和决策

以 2010 年为基准年,预测初步设计和施工图设计路线方案的路域生境质量变化、路域水源涵养量变化、路域土壤侵蚀量变化及其归一化值,如图 9 和图 10 所示。初步设计路线方案将会使路域平均生境质量降低 0.261,平均水源涵养量减少 135.064mm,平均土壤侵蚀量增加 6581.477t/ha,归一化值分别为 0.454、0.006、0.521。施工图设计路线方案将会使路域平均生境质量降低 0.255,平均水源涵养量减少 124.760mm,平均土壤侵蚀量减少 1455.306t/ha,归一化值分别为 0.458、0.010、0.480。

依据表 4 和表 5 建立了公路低生态影响评价指标及路线方案评价结果云模型(图 11),进而分别对初步设计和施工图设计路线方案进行定量评价(表 6)。

由表 6 可知,初步设计路线方案的评价指标得分和分级分别为 156、79、0.454、0.006、0.521、二级、一级、二级、一级、二级,对应的评价结果分级分别为良、优、良、一般、良,依据图 11 计算得到各评价指标的隶属度分别

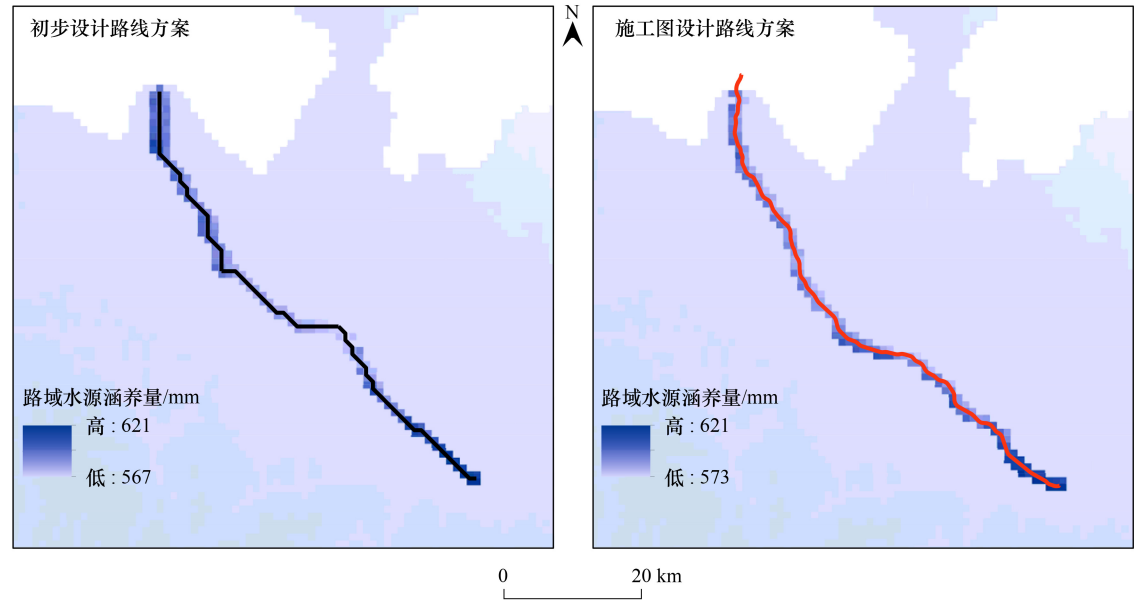


图 7 久马高速路域水源涵养量

Fig.7 Water yield of the roadway area in the Jiuma Expressway

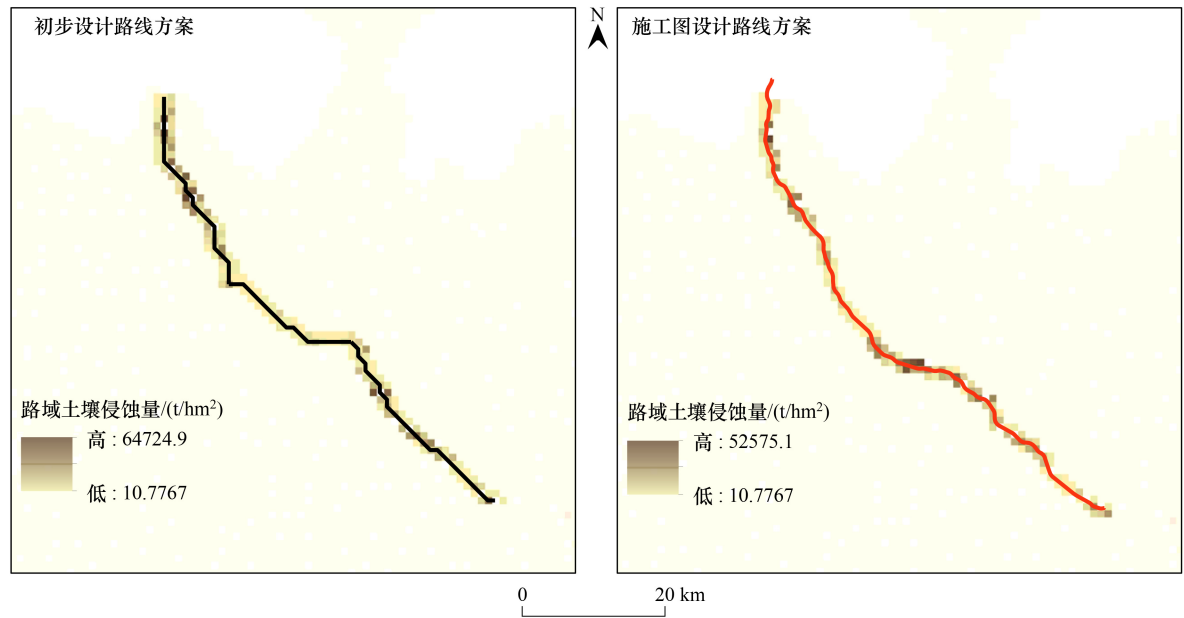


图 8 久马高速路域土壤侵蚀量

Fig.8 Soil erosion of the roadway area in the Jiuma Expressway

为 0.748、0.987、0.806、1、0.956,将多维隶属度分别输入相应的评价结果云模型中,计算得到各评价指标的得分为 0.447、0.211、0.458、0.960、0.521,采用专家咨询法设置权重向量为 0.15、0.25、0.15、0.15、0.3,因此初步设计路线方案最终得分为 0.489(良)。

同理,施工图设计路线方案的评价指标得分和分级分别为 161、97、0.458、0.010、0.480、二级、一级、二级、一级、二级,对应的评价结果分级分别为良、优、良、一般、良,依据图 11 计算得到各评价指标的隶属度分别为 0.854、0.679、0.836、1、0.959,将多维隶属度分别输入相应的评价结果云模型中,计算得到各评价指标的得分

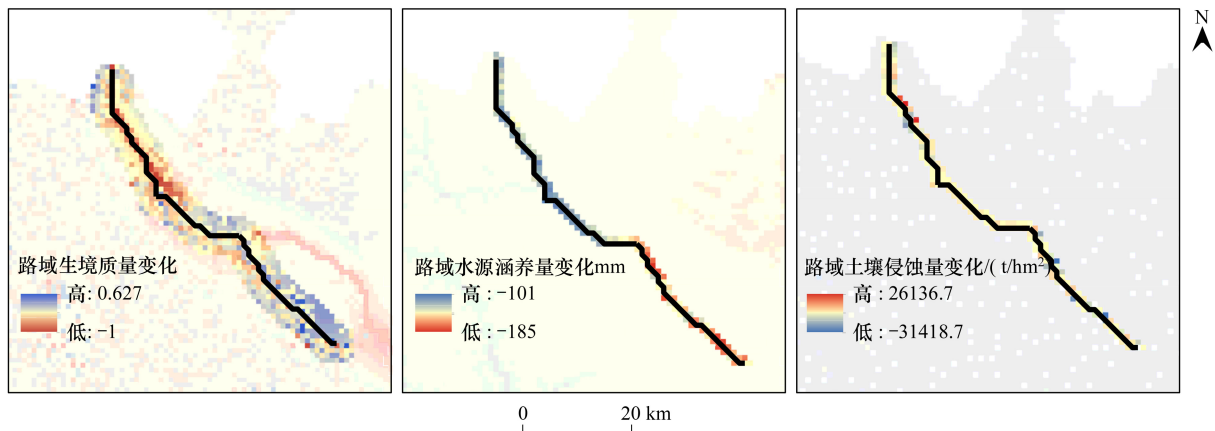


图9 初步设计路线方案对生态系统服务功能的影响

Fig.9 The impacts of route scheme on ecosystem services at the preliminary design phase

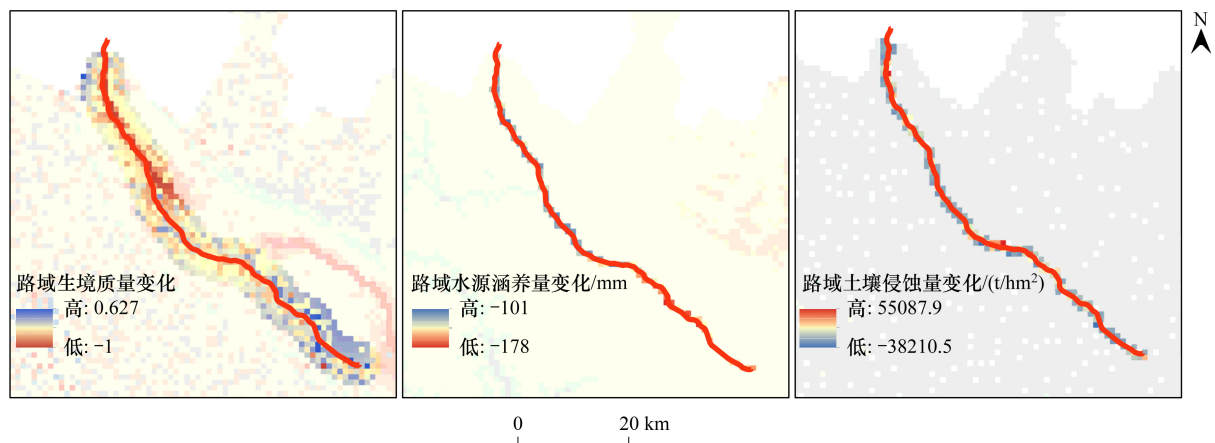


图10 施工图设计路线方案对生态系统服务功能的影响

Fig.10 The impacts of route scheme on ecosystem services at the construction drawing design phase

为 0.461、0.261、0.453、0.910、0.480,权重向量为 0.15、0.25、0.15、0.15、0.3,因此施工图设计路线方案最终得分为 0.483(良)。

综上,初步设计和施工图设计路线方案对生态系统的扰动均较小,但是施工图设计路线方案略优于初步设计路线方案,通过优化路线方案、以桥隧代路、完善边坡防护、复垦临时占地等方式,减少对山体的大挖大刷,有效保护了沿线原生态自然景观。因此,进行低生态影响路线方案设计时,建议:①路线方案禁止穿越自然保护区的核心区,公路用地边界宜尽量远离自然保护区、国家公园、自然公园等生态敏感区,无法避免穿越自然保护区缓冲区和实验区时应选择对生态环境影响较小的路线方案;②路线方案宜避开生物多样性丰富和生境完整的区域,如草甸、湿地、森林、草原、湖泊等,确需经过时可结合以桥代路、设置野生动物通道、植被保护和生态恢复等措施降低对生境的影响;③路线方案宜避开国家划分的水土流失重点预防保护区和重点治理成果区,以及易引起严重水土流失和生态恶化的地区,确需经过时应合理设置坡面截排水工程并符合规范要求;④生态敏感区的公路宜通过合理规划设计速度、充分利用圆曲线半径、优先采用顺直线形等方式缩短穿越生态敏感区的路线长度,应结合区域地形地貌特点优化设计纵坡坡度,避免大改大建,减少对沿线环境的扰动和破坏,宜减少横断面宽度,确需设置宽幅路面时应在合适位置设置野生动物通道和牧道等便道。

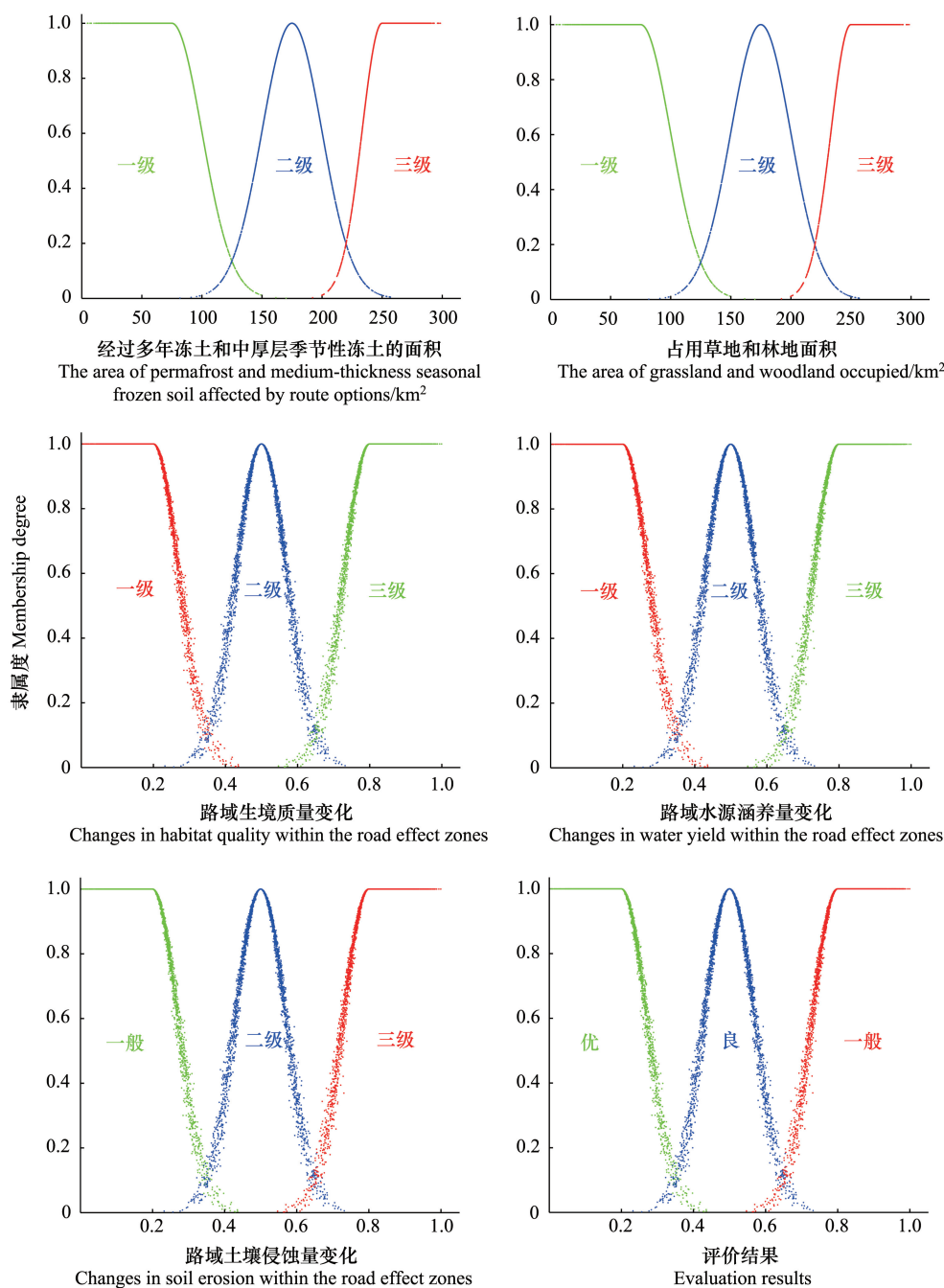


图 11 评价指标及评价结果云模型

Fig.11 Cloud models for evaluation indicators and results

4 结论

(1) 本研究针对青藏高原地区公路建设,建立了考虑公路特征和自然环境因素的路域生态系统服务功能预测模型,在此基础上,从生态环保角度出发,构建了公路低生态影响评价指标体系,包括路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积、路线方案占用草地和林地面积、路域生境质量变化、路域水源涵养量变化、路域土壤侵蚀量变化。

(2) 针对传统公路评价与决策中生态环保和量化评估方面的不足,本研究引入了多维多规则云模型对路

线方案进行评价和决策,以解决决策过程中属性分级界限不明确、相近推理结果难抉择等问题,提高评价的客观性。

(3)以久马高速 A1 标段为例进行了方法示范和应用,结果表明通过优化路线方案、以桥隧代路、完善边坡防护、复垦临时占地等方式能够降低路线工程对生态系统的扰动。研究有助于推动公路设计从粗放式定性考虑环境影响阶段迈入精细式量化分析环境影响阶段,指导规划设计人员采取有效的风险防控措施,以减轻公路建设对生态环境的负面影响。

表 6 路线方案的评价指标得分和分级
Table 6 Evaluation indicator scores and classifications of route schemes

评价指标及路线方案得分 Evaluation indicators and route scheme scores	初步设计路线方案 Preliminary design route scheme			施工图设计路线方案 Construction drawing design route scheme			指标权重 Indicator weights
	评价指标得 分及分级	隶属度	评价结果分 级及得分	评价指标得 分及分级	隶属度	评价结果分 级及得分	
C ₁ :路线方案经过多年冻土和中厚层季节性冻土的面积/km ² The area of permafrost and medium-thickness seasonal frozen soil affected by route options	156 (二级)	0.748	良 (0.447)	161 (二级)	0.854	良 (0.461)	0.15
C ₂ :路线方案占用草地和林地面积/km ² The area of grassland and woodland occupied	79 (一级)	0.987	优 (0.211)	97 (一级)	0.679	优 (0.261)	0.25
C ₃ :路域生境质量变化 Changes in habitat quality within the road effect zones	0.454 (二级)	0.806	良 (0.458)	0.458 (二级)	0.836	良 (0.453)	0.15
C ₄ :路域水源涵养量变化 Changes in water yield within the road effect zones	0.006 (一级)	1	一般 (0.960)	0.010 (一级)	1	一般 (0.910)	0.15
C ₅ :路域土壤侵蚀量变化 Changes in soil erosion within the road effect zones	0.521 (二级)	0.956	良 (0.521)	0.480 (二级)	0.959	良 (0.480)	0.30
SS:路线方案得分 Route scheme scores		0.489			0.483		

(4)公路决策通常需要协调安全、经济、功能、环保等多个目标,下阶段将综合考虑各个目标之间的权衡关系,以实现最优的决策方案。同时,通过引入人工智能和机器学习等智能决策技术对路线方案中的大数据进行分析和挖掘,提供更精准的决策支持,提高公路决策的科学性和效率。

参考文献 (References):

[1] 张佳文, 祁帆, 张定祥, 邹立, 袁承程. 2010—2020 年国家重点生态功能区生态质量改善效果评价. 生态学报, 2024, 44(21): 1-14.

[2] 沙清泉, 黄麟, 樊江文, 张良侠. 青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险时空动态及其驱动机制. 生态学报, 2024, 44(19): 8726-8736.

[3] Shen Y F, Li Q, Pei X, Wei R J, Yang B M, Lei N F, Zhang X C, Yin D Q, Wang S J, Tao Q Z. Ecological restoration of engineering slopes in China—a review. Sustainability, 2023, 15(6): 1-12.

[4] Chen Z M, Yunas W, Shao L, Yuan Q L, Zeng Y L, Liu S M. Characteristic tests for waste mud and drilling sludge and reuse of solidification from plateau ecological reserve. Buildings, 2023, 13(4): 1047.

[5] Huang M J, Zhang Y L, Hu J N, Hei Y P, Xu Z K, Su J C. Experimental study on pore pressure variation and erosion stability of sandy slope model under microbially induced carbonate precipitation. Sustainability, 2023, 15(16): 12650.

[6] Bai Y X, Liu J, Xiao H L, Song Z Z, Ma K, Deng Y F. Soil stabilization using synthetic polymer for soil slope ecological protection. Engineering Geology, 2023, 321: 107155.

- [7] Xu X, Luo Y, Sreeram A, Wu Q Y, Chen G F, Cheng S K, Chen Z W, Chen X Y. Potential use of recycled concrete aggregate (RCA) for sustainable asphalt pavements of the future: a state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 344: 130893.
- [8] Wang C H, Li Y D, Wen P H, Zeng W, Wang X Q. A comprehensive review on mechanical properties of green controlled low strength materials. *Construction and Building Materials*, 2023, 363: 129611.
- [9] Jia X L, Qin X F, Zhu J Y, Xiao Z, Guo W J. Carbon emission pattern of driving car on vertical curves of highway. *Sustainability*, 2023, 15(8): 6460.
- [10] Su E M, Li H, Zhang J B, Xu Z J, Chen B D, Cao L N Y, Wang Z L. Rationally designed anti-glare panel arrays as highway wind energy harvester. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(17): 2214934.
- [11] Lee W S, Tran T M, Yu L B. Green infrastructure and air pollution: evidence from highways connecting two megacities in China. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2023, 122: 102884.
- [12] 江小鸿. 基于层次分析法的湿地公园生态影响评价——以潼湖国家湿地公园为例. *绿色科技*, 2023, 25(1): 56-61.
- [13] 孙振国. 基于层次分析法、模糊综合评价法对粤西天然气长输管道项目生态环境影响研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [14] 党磊涛. 填海淤泥地区隧道工程的生态环境影响评价研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [15] Zeng L, Li J. A Bayesian belief network approach for mapping water conservation ecosystem service optimization region. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(6): 1021-1038.
- [16] Li C Q, Ding L Y, Zhong B T. Highway planning and design in the Qinghai - Tibet Plateau of China: a cost - safety balance perspective. *Engineering*, 2019, 5(2): 337-349.
- [17] Llagostera P, Comas C, López N. Modeling road traffic safety based on point patterns of wildlife-vehicle collisions. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157237.
- [18] Guo Z Q, Yan Z J, PaErHaTi M, He R, Yang H, Wang R, Ci H. Assessment of soil erosion and its driving factors in the Huaihe region using the InVEST-SDR model. *Geocarto International*, 2023, 38(1): 2213208.
- [19] Islam F, Ahmad M N, Janjuhah H T, Ullah M, Islam I U, Kontakiotis G, Skilodimou H D, Bathrellos G D. Modelling and mapping of soil erosion susceptibility of muree, sub-Himalayas using GIS and RS-based models. *Applied Sciences*, 2022, 12(23): 12211.
- [20] 杨艳刚, 崔慧珊, 柳雁玲, 王云, 关磊, 黄山倩. 道路网影响区景观格局变化分析——以呼伦贝尔市为例. *交通运输研究*, 2020, 6(4): 18-26.
- [21] Wei J Q, Zhang Y, Liu Y, Li C, Tian Y S, Qian J, Gao Y, Hong Y S, Liu Y F. The impact of different road grades on ecological networks in a mega-city Wuhan City, China. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108784.
- [22] Qin X C, Wang Y K, Cui S N, Liu S, Liu S L, Wangari V W. Post-assessment of the eco-environmental impact of highway construction - A case study of Changbai Mountain Ring Road. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 98: 106963.
- [23] Xu C, Pu J, Wen B, Xia M. Potential ecological risks of heavy metals in agricultural soil alongside highways and their relationship with landscape. *Agriculture*, 2021, 11(8): 800.
- [24] 丁天贵, 谭衢霖, 王雪甜, 谭浩银, 秦晓春. 基于云模型和累积前景理论的山区铁路绿色低碳线路优选. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(9): 3822-3830.
- [25] 李彬, 朱朋朋, 肖润谋, 李子添, 靳引利. 组合赋权云模型在高速公路通道适应性评价上的应用. *交通运输工程学报*, 2023, 23(5): 223-233.
- [26] 李洁, 刘邱琪, 张欣宇, 韦媛媛, 张晶晶. 基于组合赋权-云模型的高速公路网交通韧性评价. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2023, 50(11): 224-234.
- [27] 张建伟, 毋伟涛, 侯鸽, 黄锦林, 王兵鹏, 刘洪泽, 呼梓旭. 基于权重优化-云模型的土石坝运行安全综合评价. *工程科学与技术*, 2024: 1-13.
- [28] Zhang H, Xu X, Zhang C, Fu Z P, Yang H Z. Novel method for ecosystem services assessment and analysis of road-effect zones. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 127: 104057.
- [29] Zhang H, Zhang C, Hu T, Zhang M, Ren X W, Hou L. Exploration of roadway factors and habitat quality using InVEST. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 87: 102551.
- [30] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl A L, Rogers L, Bierbower W, Denu D, Douglass J. InVEST 3.5.0 User's Guide. 2018.
- [31] Asadolahi Z, Salmanmahiny A, Sakieh Y, Mirkarimi S H, Baral H, Azimi M. Dynamic trade-off analysis of multiple ecosystem services under land use change scenarios: towards putting ecosystem services into planning in Iran. *Ecological Complexity*, 2018, 36: 250-260.

- [32] Hu T H, Chang J, Liu X X, Feng S S. Integrated methods for determining restoration priorities of coal mining subsidence areas based on green infrastructure: a case study in the Xuzhou urban area, of China. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 164-174.
- [33] Li X W, Hou X Y, Song Y, Shan K, Zhu S Y, Yu X B, Mo X Q. Assessing changes of habitat quality for shorebirds in stopover sites: a case study in Yellow River Delta, China. *Wetlands*, 2019, 39(1): 67-77.
- [34] Shaffer J A, Roth C L, Mushet D M. Modeling effects of crop production, energy development and conservation-grassland loss on avian habitat. *PLoS One*, 2019, 14(1): e0198382.
- [35] 王懋源, 齐实, 郭衍瑞, 张鹏, 赖金林, 张林, 马路霞, 刘少栋. 藏东-川西生态维护水源涵养区产水量驱动机制探讨. *生态学报*, 2024, 44(21): 9520-9534.
- [36] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R. Roots, storms and soil pores: incorporating key ecohydrological processes into budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 2012, 436: 35-50.
- [37] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 胡治鹏, 王玉宽. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 577-585.
- [38] 孙见伟. 基于 InVEST 模型的都昌县土地利用/覆被变化产水效应研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
- [39] Hacısalıhoğlu S, Gümtiş S, Kezik U, Karadağ H. Impact of forest road construction on Topsoil Erosion and hydro-physical soil properties in a semi-arid mountainous ecosystem in Turkey. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 28(1): 113-121.
- [40] 何莎莎. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域水土流失研究[D]. 郑州: 河南大学, 2018.
- [41] Desmet P J J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1996, 51(5): 427-433.
- [42] Farias T R L, Medeiros P H A, de Araújo J C, Navarro-Hevia J. The role of unpaved roads in the sediment budget of a semiarid mesoscale catchment. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(18): 5443-5454.
- [43] Li Y, Qi S, Liang B, Ma J M, Cheng B H, Ma C, Qiu Y D, Chen Q Y. Dangerous degree forecast of soil loss on highway slopes in mountainous areas of the Yunnan-Guizhou Plateau (China) using the Revised Universal Soil Loss Equation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(4): 757-774.
- [44] 狄鹏, 倪子纯, 尹东亮. 基于云模型和证据理论的多属性决策优化算法. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(4): 1061-1070.
- [45] 张宏. 基于知识驱动的青藏高原地区公路生态地质选线方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [46] Zhang C, Zhang H, Zhang M, Gong Q L. Novel prediction method for highway distresses in permafrost regions based on qualitative reasoning of multidimensional and multirules cloud model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019(1): 1-10.