

道路工程胁迫下生态系统适宜性研究^{*}

刘杰¹, 陈帆¹, 朱建军², 仇昕昕¹

(1. 环境保护部 环境工程评估中心, 北京 100012; 2. 教育部 高等教育出版社, 北京 100029)

摘要: 道路工程胁迫下生态系统适宜性是生态效应的逆向研究, 它从生态系统的角度出发, 以生态系统结构和功能稳定性为标准, 探讨生态系统对道路工程建设的适宜程度。生态系统适宜性的时空差异性构成其特有的属性特征, 空间上表现为系统属性上和工程建设性质上的差异性, 在时间上表现为对公路不同建设时期的适宜性差异。生态系统适宜性研究关注的核心问题是临界阈值确定、指标体系和评估模型的建立。通过工程建设的干扰强度与系统稳定性的比较, 确定生态系统适宜性的临界阈值, 采用 AHP 法并选取工程强度指标、系统特征指标, 建立适宜性评价指标体系, 最终基于三个基本假设的前提, 构建了适宜性评估理论模型, 为适宜性的量化研究提供了理论基础。

关键词: 生态系统适宜性; 工程道路; 胁迫; 时空特征

中图分类号: X177.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)06-0010-06

Study on Ecosystem Suitability Stressed by Road Projects

LIU Jie¹, CHEN Fan¹, ZHU Jian-jun², QIU Xin-xin¹

(1. Appraisal Center for Environment & Engineering, State Environmental Protection Administration, Beijing 100012, China; 2. High Education Press, Beijing 100029, China)

Abstract: There has been increasing interest in studying ecosystem impacts of road projects. Studying ecosystem suitability concepts showed that ecosystem suitability stressed by road projects which mainly studied the proper degree of road projects effecting on ecosystem according to ecosystem structure and function stability was a converse to ecological effect study. Ecosystem suitability could be expressed as differences among variable succession and road projects constructions phases in temporal scales and differences of ecosystem attributes and the road building properties in spatial scales by analyzing its attributes and characteristics. And its key problems included identifying its threshold quantity and establishing indices system and assessment model. Comparing road project intensity with the ecosystem stability can identify the ecosystem suitability threshold quantity. Ecosystem suitability assessment indices system will be established through electing indices including road project intensity, ecosystem and its response using AHP methods. The assessment theory model based on three basic hypothesizes provides fundamental basis for quantizing ecosystem suitability.

Key words: ecosystem suitability; road project; stree; characteristics of temporal-spatial scales

近几十年来,随着全球人类活动地不断加剧,自然生态系统正面临新的威胁,总体上呈现恶化趋势。在各种人类活动中,道路已经成为当今社会和经济发展的中枢,其分布范围之广和发展速度之快,都是其他人类建设工程不能比拟的^[1]。当道路和各种交通工具为人类社会带来巨大效益的同时,也给区域自然生态系统和城市环境带来了许多负面影响,并长期被人类社会所忽视^[2-3],近期的有关研究表明这

种影响至少涉及到全球陆地的 15%~20%^[4]。目前道路建设的生态影响已开始引起各国政府部门的重视,如在《亚洲公路网政府间协定》中就特别强调了环境保护的重要性,突出了在规划道路新项目和重建或改造现有道路时进行环境影响评估的必要性。但是,道路对生态系统影响的现有研究,主要集中在工程建设产生的生态负效应方面,如高速公路对动物活动的影响^[5-6]、通道阻隔效应^[7]、交通污染

* 收稿日期: 2009-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(40701173); 环保公益性科研专项经费项目(200809072)

作者简介: 刘杰(1975-),男,河北迁西人,博士,副研究员,主要从事生态效应与规划环评研究, E-mail: liujie@acee.org.cn。

扩散^[8]等, 而从生态系统特性出发, 探讨系统结构和功能与道路工程胁迫的交互作用关系的研究还比较欠缺^[9-11]。生态系统类型结构和功能的差异性, 导致系统在面对道路胁迫时的稳定程度不同, 进而表现出对道路工程的不同适宜程度。通过对生态系统适宜性的研究, 可以认识生态系统的稳定机制与平衡规律, 有助于判别道路工程强度对生态系统的干扰程度, 为道路建设中生态系统保护的相关政策、规划和行动的制定提供科学依据, 对提高道路规划管理的决策水平有着十分重要的意义。鉴于相关研究的欠缺, 本文将从生态系统适宜性概念和属性特征入手, 对其临界阈值的确定、评价指标体系、评估模型构建等核心问题进行研究。

1 生态系统适宜性的概念

道路工程胁迫下的生态系统适宜性概念是从土地适宜性中衍生出来的。根据《中国大百科全书》中土地适宜性的定义是“指一定地段土地对特定、持续用途的适宜程度”。土地适宜性研究是从粮食生产的需求出发的, 因此始于宜农土地研究, 之后向着林地、园地、牧草地等各类用地不断拓展和深化, 并出现了土地生态适宜度等新概念^[12]。土地适宜性的研究目的是为土地利用和管理提供依据。除土地方面的研究外, 适宜性研究也应用于自然保护区建设^[13]、农业气候^[14]、区域生态环境^[15]等其他研究领域。在社会经济领域里, 也产生了城市区位适宜度和城市生态系统适宜度^[16]等概念, 前者是从功能上对城市各区位因子与城市居民需求间的适合性测度, 后者则指城市的现实生态位与其最佳生态位的贴近程度, 反映了城市生态系统的和谐性、城市居民生活的适宜程度、城市竞争力大小和可持续发展能力。

通过对适宜性各种概念的分析^[12, 16-19], 可以将适宜性概括为“研究主体对特定客体适宜程度的反映”。从不同的研究主体出发, 会产生不同的适宜性概念, 其内涵和外延均不同。生态系统适宜性是以生态系统为研究主体的, 研究客体是外界的胁迫因素, 即道路工程建设对生态系统的胁迫, 它可以看作是生态效应的逆向研究(图 1)。生态效应研究是从干扰因素出发, 通过研究其对生态系统的影响机理, 最终得到生态系统变化的结果, 而适宜性研究是从生态系统类型的结构与功能上特点出发, 通过研究其适应机理, 最终确定不同生态系统类型对道路工程的适合程度。二者从不同的角度, 探讨了道路与生态系统的交互作用关系。生态系统是一个动态平衡系统, 在结构和功能上具有一定的自稳定能力, 它

可以做为适宜性的判别标准, 据此道路工程胁迫下的生态系统适宜性概念可以概括如下:

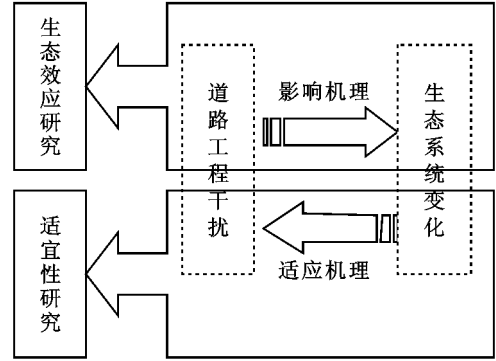


图 1 生态效应与适宜性研究对比

生态系统具有通过自适应行为消纳和吸收道路工程的影响, 从而维持其固有属性的能力, 即系统具有自稳定能力, 当工程的干扰强度不高于系统的自稳定能力时, 系统可以维持其原有属性, 生态系统对公路建设的不同干扰强度的适宜程度即生态系统适宜性。

在适宜性研究中值得注意的是, 由于适宜性与适应性等词具有相似性, 因此在相关的研究文献中经常看到这些词汇的混用。产生概念混淆的原因, 一方面是由于适宜性和适应性研究本身的相似性强, 容易发生歧义; 另一方面是研究者所处的学科领域不同, 从学科的习惯性用语出发, 对于二个概念的区别没有一个明确的认识。事实上, 适宜性与适应性是两个不同的概念, 主要体现在研究对象的不同, 适宜性研究的主体是生态系统, 以其固有属性不变为前提, 研究生态系统内部结构和功能特性对客体的适合程度。而适应性研究的主体是生物个体(群体), 研究其改变自己以顺应环境条件变化的过程, 因此适应性研究的不是主体固有属性的稳定性, 而是研究主体的活动、过程或结构本身对环境变化进行自我调整的能力。

2 生态系统适宜性的属性特征

生态系统适宜性的概念虽然在不断的深化与扩展, 但大多还局限于较为简单的研究层面上, 缺乏复杂系统层面的研究, 即以生态系统的结构-功能-演化为研究对象的适宜性研究^[20]。生态系统适宜性是多种因素相互作用与累积的结果, 干扰强度和过程的差异, 生态系统类型的差别等, 使得生态系统适宜性在时间和空间上表现出较大的差异性, 因此, 生态系统适宜性的属性特征可以从其时空变化中体现出来。

2.1 生态系统适宜性的空间特征

生态系统适宜性在空间上表现出明显的差异

性,其原因一是由于道路工程建设的性质差异引起的,另一个是由生态系统自然属性差异所决定的。因此耦合工程建设的各个干扰因素与生态系统特征状况,才能最终确定不同生态系统类型对不同工程扰动强度的适宜性。

从道路工程角度出发,其对生态系统的影响可以体现在以下几个方面:道路类型(封闭式与开放式道路)、道路等级(高速公路、等级公路和等外公路)、施工方式(护坡、桥梁、隧道)、载车程度(高负荷、中等负荷、低负荷)、道路位置(河谷、坝区、缓坡、山顶)等。生态系统面对不同的扰动方式,会产生相应的结构和功能变化,以施工方式的影响为例,图 2a 为

护坡工程,削坡改变了原有坡面的形态,对生态系统结构和功能表现为直接的影响,坡顶形态的变化与公路增加,对护坡周围产生间接影响;图 2b 为桥梁工程,施工不改变原有坡面的形态,对生态系统结构和功能表现为间接影响,其直接影响仅存于桥墩施工对坡底的影响;图 2c 为隧道工程,它对山体表面不会构成直接破坏,其影响主要体现在隧洞两侧,排水渠等工程对生态系统的影响,但工程建设改变了内部结构,隧洞和坡顶的间接影响会逐渐显现出来。由于生态系统类型结构和功能的差异性,对上述扰动的适宜程度也不相同,因此,生态系统在空间上会表现出不同的适宜性。

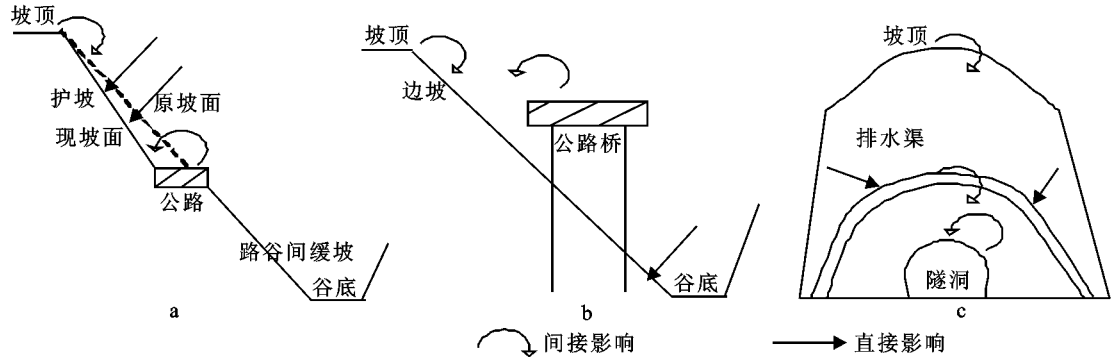


图 2 施工方式对生态系统的影响机理

另一方面,生态系统类型之间存在属性差异,生态系统组成结构和功能上的差异性,使其在相同的胁迫下,在空间上产生适宜性的差别。本研究以西南纵向岭谷区(Longitudinal Range- Gorge Region)为研究对象^[21],它是指位于我国西南、与青藏高原隆升直接相关联的横断山及毗邻的南北走向山系河谷区。该区具有独特的地形、地貌特征,气候类型复杂,地带性和非地带性分异明显,集中了西部山区、高原等地貌类型,地理情况复杂,由众多的河流峡谷将整个单元中从亚热带到亚高山等气候带切割成许多子单元,海拔高度由谷底的 1 000 m 左右,上升到常年积雪最高峰的 6 000 多米,是反映地球演化重大事件的关键区域,其雄奇的纵向山系大河构成了全球独特的高山峡谷景观,拥有北半球的绝大多数生物群落类型和除沙漠与海洋外的各类生态系统;具有资源富集、环境复杂、生态脆弱、灾害频发、经济发展层次低、短期开发行为多、环境退化加剧、普遍贫困等诸多特点,对其进行研究对解决西部山区生态建设和基础设施建设中的关键科学问题具有重大作用。

从研究区生态系统特点出发,地貌、土壤和植被因子是本区的主要制约因子,因而地貌类型、土壤类型和植被类型的组合构成了适宜性的基准评价单元图 3 中 A、B、C 分别代表 3 种制约因子,D 为生态系

统适宜性。3 种因子的差异,决定了系统结构和功能上的差异,从而导致系统适宜性的差异。3 种因子叠加的结果,构成了基准评价单元在空间类型上的多样性,表明系统的初始背景不同,所对应的适宜性结果也不同。适宜性评价的目的就是要阐明不同类型的评价单元对道路建设的适宜程度。

自然生态系统结构一般可以概括为基础层(母质层)、土体表层和植被层 3 个子系统,当道路工程穿越之后,在原有基础上又增加了一个新的道路生态系统,它由道路和道路影响带组成。道路具有明显的边界,通过道路施工直接改变了原有生态系统的性质,对生态系统的影响为直接影响;道路影响带的边界是模糊的,对生态系统的影响不是工程直接的破坏和改变,而是通过道路建成后的间接效应表现出来。道路子系统的出现,使生态系统原有的结构发生局部或整体的改变,这种变化因其作用的基准评价单元性质而不同。生态系统适宜性评价的空间基准是建立在生态系统类型之上的,道路建设尤其是道路网的建设,在空间上对生态系统结构呈现出明显的空间分割作用、廊道效应等,导致生态系统空间的评价基准单元结构的变化。从功能上看,道路子系统改变了生态系统原有功能,在生态特征上表现为温湿度变化快,持水性差,土壤养分损失等,

导致评价基准单元的功能损失。因此应从生态系统空间的差异性出发, 研究生态系统结构和功能变化, 最终判定生态系统适宜性的空间差异性。

2.2 生态系统适宜性的时间特征

生态系统适宜性在时间整体性、有序性上, 是过去、现在、未来 3 个层面上综合的结果。在分析现状的基础上对过去进行评估, 对未来情景进行预测, 3 个视角合一才能构成生态系统适宜性完整的时间特征。

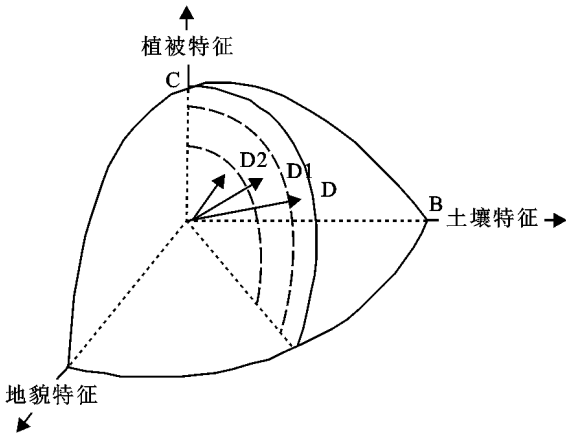


图 3 生态系统适宜性与系统属性差异的关系

根据生态系统内道路建设和使用的时间, 将道路在时间上划分为已建公路、在建公路和规划公路。建设时间的不同使工程对生态系统的胁迫性质、胁迫程度均产生了差异, 导致生态系统对其适宜程度也不相同(图 4)。已建公路通过集聚效应压缩了系统适宜性的空间, 使系统适宜性下降, 已建公路特别是建设时间较早的历史公路, 会在公路周边地区引发公路的集聚效应, 在原有的公路两侧会集聚起相对密集的人口, 形成较为完整的村镇, 随之而来的是对生态系统类型的人工化改造, 即原有的自然生态系统类型被人工农田或果园等替代、原有的景观模式, 被新型景观模式替代, 因此, 对已建道路, 特别是开放式管理道路的研究焦点应着眼于集聚效应的研究。在建公路通过强度效应压缩系统的适宜性空间, 在建道路特别是高等级封闭式管理的道路, 生态系统的适宜性主要体现在道路建设的强度效应上, 工程强度是生态系统结构和功能变化的主要决定因素, 同时由于在建公路存在在施工期和营运期的时间差异, 生态系统适宜性会随之产生相应的时间性变化。对于规划道路, 生态系统适宜性必须综合考虑各种因素, 其中也包括公路建设初期的强度效应与营运期的集聚效应对生态系统的影响, 通过研究区域内各类生态系统类型对已建和在建道路的适宜性, 推演生态系统对规划道路的适宜性, 以及适宜性随时间变化的可能性。因此在生态系统适宜性研究

中, 必须充分考虑其时间特征。

3 生态系统适宜性临界阈值的确定

阈值是一个区间概念, 强调的是有界性。生态系统是一个动态平衡系统, 其平衡的基础是结构和功能的稳定性。根据 Selye 的理论, 受胁系统表现为 3 个阶段, 即预警阶段、抗衡阶段和耗竭阶段。道路工程的胁迫, 将使生态系统的结构和功能发生改变, 这种改变一旦超出某一限度, 系统平衡即被打破, 生态系统的性质也随之变化。生态系统适宜性实际上是生态系统自身的一种固有属性的体现, 它是以系统结构和功能的相对稳定为前提的, 因此也必然具有一个阈值, 生态系统维持稳定的最大生态功能空间就是生态系统适宜性的阈值, 而适宜与不适宜的临界阈值即抗衡阶段与耗竭阶段的临界区间。生态功能空间表现为系统自身的稳态能力、生产能力和演替能力。所谓稳态能力是指生态系统内部的调控能力和对外界的适应能力, 内部调控产生系统内部的有序性, 对外界的适应能力可抗外界不良干扰, 可接受外界良性影响; 生产能力是指生态系统内生物的生产量和生长状况; 演替能力是指生态系统的发展方向 and 进程。生态系统适宜性阈值是这 3 种能力的正比函数。当生态系统最大生态功能空间被突破, 生态系统性质会发生变化, 将由适宜系统转变为不适宜系统, 其临界范围称为临界阈值, 它是生态系统适宜性研究的关键问题之一。

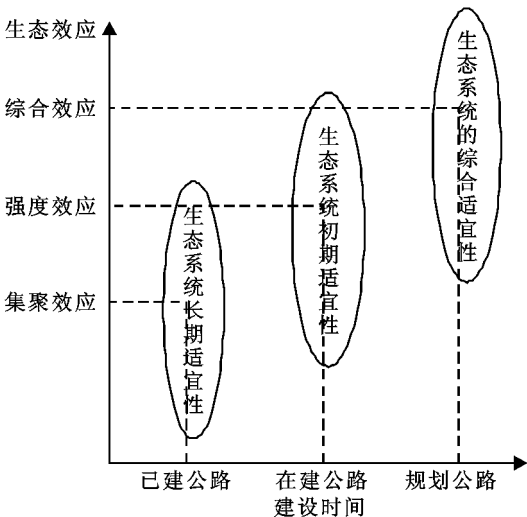


图 4 生态系统适宜性的时间特征

临界阈值的确定方法在相关研究中各有不同。有的采用生物学标准, 将动植物的生态幅作为临界阈值, 如以生物的温度生态幅为标准^[22]。有些采用国际或国内的通用标准, 如水质研究以国家饮用水标准的上限值为标准^[23]。在没有通用标准时可以采用人为标准, 通过特尔菲法等方法进行界定。还

有些研究不界定临界阈值,只按适宜性高低排序,进行分类比较^[24]。

由于生态系统的复杂性和不确定性,其适宜性临界阈值没有一个通用标准。生态系统稳定性可以作为反映生态系统性质和整体状况的标准,系统稳定性越高,受扰后变化的程度越小,则对工程建设的适宜性越高。道路工程做为干扰因素,其强度与稳定性存在负相关函数关系,即随着干扰强度的增大,生态系统稳定性下降,这样通过工程强度与系统稳定性的耦合关系,就可以得到生态系统适宜性的判定结果。图 5 是生态系统适宜性的概念模型,图中 P 代表干扰强度, S 代表系统稳定性, Y_1 和 Y_2 分别为未受扰动的生态系统稳定性和受扰生态系统稳定性的临界值。未受扰动的生态系统是自然选择的结果,因此可以假定其稳定性最高。随着干扰强度的增加,系统稳定性下降,当干扰强度达到 P_{\max} 时,系统稳定性达到临界值,即 C 点,此时系统处于临界适宜状态, O, P_{\max}, C, S_{\max} 包围的区域为生态系统的适宜区。当干扰强度超出 P_{\max} 时,系统稳定性急剧下降,生态系统为不适宜状态,系统面临性质上的改变,原有系统处于崩溃状态,也就是说通过干扰强度与系统稳定性的相关关系,可以确定生态系统适宜性的临界阈值。从系统优化的角度,根据生态系统稳定性状况的变化情况,可以界定系统适宜程度的大小,当干扰强度达到 P_1 时,系统处于 S_1 状态, O, P_1, A, S_{\max} 所包围的区域为高度适宜,当干扰强度达到 P_2 时,系统处于 S_2 状态, P_1, P_2, B, A 所包围的区域为较适宜,干扰达到最大时, P_2, P_{\max}, C, B 包围的区域为基本适宜区。

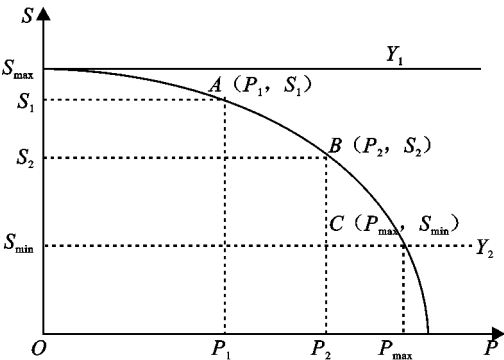


图 5 生态系统适宜性判定关系示意图

4 生态系统适宜性评估模型的构建

由于生态系统的复杂性和不确定性,因此,构建一个指标体系对其特征进行分解是十分必要的。对于复杂指标问题目前国内常用的评价方法是层次分析法(AHP),它把一个复杂的问题表示为有序统一

处理决策中的定性与定量因素,具有实用性、系统性、简洁性等优点。层次分析法将复杂的问题分解成组成要素,建立层次递阶结构、构造两两比较判断矩阵、计算单一准则下元素的相对权重、计算各层因素的组合权重。最终计算结果得出最低层次元素相对重要性排序,即权重向量。

生态系统适宜性研究中,涉及的研究指标很多、性质各异,在本研究中将指标体系分为 4 个层次,第 1 层次为目标层,即生态系统适宜性指数;第 2 层次为准则层,包括干扰强度指数、生态系统特征值指数和响应指数。这些指标都不是简单指标,是相关指标的复合体,如工程干扰强度指标是道路类型、施工方式、道路等级等多因素的复合函数;生态系统特征指标则是生态系统稳态能力、生产能力和演替能力的复合函数,它们共同构成指标体系的第 3 个层次——综合指标层。综合指标层最终通过要素指标表达出来,如道路宽度、森林覆盖率、生物的净第一性生产力、生物多样性指数等的变化率。从可度量性角度,上述指标可以分为定量变量和定性变量,其中使定性变量转化成定量变量,可以使比较复杂的评价工作转化为某种数学模式。由于生态系统适宜性是一个多要素、综合尺度的研究,要素相关性判定与尺度推绎的困难性,使生态系统适宜性评价难以用简单的方法实现,其研究方法必然是多种方法的综合与集成,据此构建生态系统适宜性评估模型成为研究工作的必然。为完成模型的构建,首先引入生态系统特征值指数的概念,它是生态系统某种状态下结构和功能特征的量化值,其函数关系可由式(1)反映出来。

$$C_i = f[x_i(u, v, w), y_i(u, v, w), z_i(u, v, w)] \quad (1)$$

式中: C_i ——某一生态系统类型的特征值指数; x ——生态系统稳定性指数; y ——生态系统生产性指数; z ——生态系统演替指数; u, v, w ——分别为道路等级、类型、施工方式等工程干扰强度指数。

生态系统特征值指数,反映的是生态系统结构和功能的状态特征,因为生态系统适宜性研究的目的是探讨生态系统状况对道路建设的适合程度,因此这个指数反映的只是生态系统受道路工程胁迫时变化的幅度,而不是系统健康的判定标准。生态系统特征值指数既包括了系统自身稳定性,又耦合了工程建设干扰的各个影响因素。生态系统适宜性研究是基于几个假设之上的。

假设一:未受道路工程干扰的生态系统,其生态系统特征值指数最高。

假设二:道路工程是生态系统的胁迫因素,降低

生态系统的特征值指数。

假设三:生态系统特征值指数与干扰强度成负相关关系,即干扰强度越大,生态系统表现出来的特征值指数越小。

从这3个假设出发,提出生态系统适宜性评价的理论模型(公式2)。

$$F_i \propto \frac{|C_i - C_j|}{|C_i|} = \begin{cases} 0 \\ (1 - \frac{S_i - S_{\max}}{S_{\min} - S_{\max}}) \cdot \beta \\ 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_i ——生态系统适宜性; C_i ——未受扰动的原有生态系统特征值指数; C_j ——受扰动的自然生态系统特征值指数; S_i —— i 种生态系统类型现状稳定性测度值; i —— i 种生态系统类型现状稳定性测度值; S_{\min} 和 S_{\max} 分别为 i 种生态系统类型稳定性测度下限和上限值; β ——经验系数。

由于式(2)可以看出,将道路建设前后,即未受干扰的生态系统与受扰系统进行比较,生态系统特征值没有变化时,说明受扰系统靠自身的平衡能力,基本消纳了干扰的影响,则 F 值趋向于0,生态系统为适宜生态系统。反之,受扰生态系统特征值指数趋向于0时,说明原始系统的特征在受扰后已经基本消失,系统从本质上发生了改变,则 F 值趋向于1,系统为不适宜生态系统。当生态系统结构和功能处于前两者之间某一区域时,为系统适宜性的临界值。对于区域来讲,根据区域特点,生态系统类型即包括不同演替时间阶段的各种类型,也包括不同的地貌类型,植被类型,土壤类型等叠加组成的多个性质不同的基准空间评价单元,则区域生态适宜性是时间特性与空间特性的综合,这样可以将公式(2)进一步推广到公式(3)。

$$F_j = \left(\prod_{i=1}^n F_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中: F_j —— j 区域的综合生态适宜性评价价值; F_{ij} ——各基准评价单元的适宜性评价价值。

通过评估模型,可以对研究区内各评价单元生态系统对现有道路工程和规划道路的适宜性进行判定,并评价现有道路工程和规划工程的强度与选址的生态合理性,在此基础上对替代工程的必要性与可行性提出建议。

5 结语

从生态系统适宜性概念入手,对其属性的空间与时间特征、研究内容和研究方法等进行了探讨,为工程建设与生态系统交互作用研究提供了新的研究思路。研究目的是服务于纵向岭谷区的道路管理与

建设规划。特别是为不适宜区的道路工程建设中,考虑替代方案和保护措施提供预见性指导。

由于道路工程胁迫下生态系统适宜性研究还处在初期阶段,因此在概念、阈值确定、指标选择和理论模型等方面都不成熟,目前只是从理论上对其进行了概括,其评价结果将在随后的研究工作中给出,并通过研究区的典型案例区研究予以验证。

基于生态系统类型之上的适宜性研究,存在较强的地域性,其时间和空间都是以研究区为基准的,因此将研究成果从案例区向周边地区推广,使研究成果更具普适性,将是今后工作的一个课题。

参考文献:

- [1] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, et al. Road ecology: science and solutions [M]. Washington D C: Inland Press, 2002: 3-397.
- [2] Zhou J. Corridor effects of railway transportation and urban land use analysis [J]. Journal of Urban Railway Transportation Study, 2002, 5(1): 38-45.
- [3] Yang Y K. Basic theory of economic transportation belt and its life cycle analysis [J]. Geographical Research, 2000, 20(4): 276-286.
- [4] Forman R T T. Horizontal processes, roads, suburbs, societal objectives, and landscape ecology Landscape ecological analysis [M]. Issue and applications, 1999: 35-53.
- [5] Finder R A, Roseberry J L, Woolf A. Site and landscape conditions at white-tailed deer vehicle collision locations in Illinois [J]. Landscape and Urban Planning, 1999, 44 (2/3): 77-85.
- [6] Alexander Shelley, Nigel M, Waters M. The effects of highway transportation corridors on wildlife: a case study of Banff National Park [J]. Sage Urban Studies, 2001, 29 (1): 3-135.
- [7] Michael Soule. The Ecological Effect of Road [M]. Place Distant, 2000: 37-59.
- [8] Van Bohemen H D, Janssen W H, Van De Laak. The influence of Road infrastructure and Traffic on Soil, water and Air quality [J]. Environmental Management, 2003, 31(1): 50-68.
- [9] Bengtsson J, Nilsson Sven G, Franc Alain, et al. Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests [J]. Forest ecology and management, 2000, 132: 39-50.
- [10] Upadhyay R K, Rai V, Iyengar S R K. How do ecosystems respond to external perturbations [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2000, 11: 1963-1982.

(下转第21页)

难”问题, 以往关注较多的主要是植被恢复与生态重建、丘陵坡地的植物群落的多样性及其数量分类, 该地区灌丛生物量与空间位置、水分等单一环境因子的关系等。因此, 需要对该区域的植被与环境等各个因素进行系统的研究。

参考文献:

- [1] 吴长文, 王礼先. 林地坡面的水动力学特征及其阻延地表径流的研究[J]. 水土保持学报, 1995, 25(9): 12-23.
- [2] 杨持. 生态学实验与实习[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [3] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分变化动态[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
- [4] Yang Qiu, Bojie Fu, Jun Wang, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49: 723-750.
- [5] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720.
- [6] 李昆, 陈玉德. 元某干热河谷人工林地的水分输入与土壤水分研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(6): 651-657.
- [7] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 741-747.
- [8] 马祥华, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征及其与土壤环境的关系[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 15-22.
- [9] 章家恩, 徐琪. 恢复生态学研究的一些基本问题[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 109-113.
- [10] 刘兴良, 慕长龙, 向成华, 等. 四川西部干旱河谷自然特征及植被恢复与重建途径[J]. 四川林业科技, 2001, 22(2): 10-17.
- [11] 张文辉, 卢涛, 马克明, 等. 岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 525-529.
- [12] Burke A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountain, Namibia[J]. Journal of Vegetation Science, 2001, 12: 53-60.
- [13] 徐炳成, 山仑, 陈云明. 黄土高原半干旱区基于植被建设的土壤水分效应及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 32-35.
- (上接第15页)
- [11] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1885-1892.
- [12] 范谦, 李升峰, 时亚楼, 等. 生态适宜度评价在开发区环评和环境规划中的应用: 以江苏常熟东南开发区为例[J]. 四川环境, 2004, 23(2): 44-52.
- [13] 舒莹, 胡远满, 郭笃发, 等. 黄河三角洲丹顶鹤适宜生境变化分析[J]. 动物学杂志, 2004, 39(3): 33-41.
- [14] 任玉玉, 千怀遂, 刘青青. 河南省棉花气候适宜度分析[J]. 农业现代化研究, 2004, 25(3): 231-235.
- [15] 杨永泰. 区域城市生态环境适宜度比较方法研究[J]. 环境科学, 1995, 16(5): 33-37.
- [16] 廖红娟, 徐建华, 岳文泽. 城市生态系统适宜度的时空对比分析[J]. 生态科学, 2003, 22(4): 300-304.
- [17] Larson Michael A, Thompson Frank R, Millsbaugh Joshua J, et al. Linking population viability, habitat suitability, and landscape simulation models for conservation planning[J]. Ecological Modelling, 2004, 18(1): 103-118.
- [18] Dhaeze D, Deckers J, Raes D, et al. Environmental and socio-economic impacts of institutional reforms on the agricultural sector of Vietnam: Land suitability assessment for Robusta coffee in the Dak Gan region [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 105(1/2): 59-76.
- [19] Sicat Rodrigo S, Carranza Emmanuel John M, Nidumolu Uday Bhaskar. Fuzzy modeling of farmers' knowledge for land suitability classification[J]. Agricultural Systems, 2005, 83(1): 49-75.
- [20] 陈辉, 李双成, 郑度. 青藏公路铁路沿线生态系统特征及道路修建对其影响[J]. 山地学报, 2003, 21(5): 559-567.
- [21] 尤卫红, 何大明, 段长春. 云南纵向岭谷区地区气候变化对河流径流量的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 95-105.
- [22] 周爱国, 孙自永, 徐恒力, 等. 地质环境生态适宜性评价指标体系研究[J]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 71-74.
- [23] 李凤全, 林年丰. 神经网络和地理信息系统耦合方法在地下水水质评价中的应用[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 50-53.
- [24] 梁保平, 韩贵锋, 余丽娟, 等. 中国省域城市生态适宜度综合评价[J]. 城市环境与城市生态, 2004, 17(2): 22-24.