

公路对湿地的生态效应及其反馈的研究进展

衷平^{1,2}, 杨志峰^{1*}, 崔保山¹, 王云²

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 交通部科学研究院交通环保与安全研究中心, 北京 100029)

摘要: 公路建设能够促进经济发展, 但是对湿地生态系统造成一定的生态负效应, 对公路的湿地生态效应及其反馈理论进行探讨非常具有理论和现实意义。通过压力—状态—响应 (P - S - R) 模型建立了公路的湿地生态效应及其反馈的概念模型, 创建了理论框架; 在查阅国内外相关研究成果的基础上进一步分析了公路的湿地生态效应的内涵, 包括直接效应、间接效应以及累积效应, 直接效应又分为三级效应, 并分别阐述了各个效应的内在涵义; 分析了湿地生态对公路建设的反馈响应, 为指导最大限度地减少公路建设对湿地生态的破坏, 建设生态和和谐的公路提供理论依据和技术支持。

关键词: 公路; 湿地; 生态效应; 反馈

中图分类号: X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 5948(2009)01 - 089 - 10

随着经济的快速增长, 中国公路交通基础设施得到了显著增强, 有力地促进了国民经济的发展。公路工程建设不可避免地会穿越或者靠近湿地, 当前由于建设者自身环境意识不强, 忽视工程对湿地生态系统的影响, 给部分湿地生态系统造成了一定的破坏, 导致一些湿地生态环境日趋恶化^[1,2]。众所周知, 修建公路在当前经济正处于高速发展时期的中国不可避免, 但是如何在修建公路的同时最大限度地减小公路对湿地的负面影响是亟待解决的问题。只有深入地了解了公路工程对湿地的生态效应, 才能够对症下药, 解决问题。事实上, 在公路对湿地产生生态效应的同时, 湿地本身对公路工程的作用也会有所反馈, 这个反馈体现在对法规、工程措施、环保措施等各个方面的要求。理解湿地生态系统对工程的反馈信息, 有利于在修建公路时指导我们更好地进行湿地保护工作, 促进公路建设与湿地保护的和谐。

目前, 国内外对公路的生态效应研究主要体现在公路对陆生生态系统的作用上, 内容以植被破坏、水土流失、景观破碎、边缘效应、阻隔作用及公路污染等为重点^[3-7], 较少研究对水生生态系统的作用, 更没有系统的对公路的湿地生态效应进行研

究, 而公路网对湿地的生态累积效应研究尚处于空白。此外, 当前部分研究主要关注公路对湿地产生的生态效应, 将公路和湿地看作两个不同的生态系统。事实上, 公路与湿地在一起互相作用之后, 逐渐融合而成为了同一个生态系统, 公路对湿地产生生态效应的同时也接受到湿地的反馈信息, 二者处于一种生态循环作用之中。因此本文以生态系统生态学、环境科学等为理论基础, 通过压力—状态—响应 (P - S - R) 模型确定了公路的湿地生态效应及其反馈机制的概念与内涵, 力图为国内外相关研究提供参考和借鉴。

1 概念模型

根据联合国经济合作开发署 (Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 建立的 压力—状态—响应 (Pressure - State - Response, P - S - R) 框架模型^[8,9], 建立了公路工程的湿地生态效应及其反馈机制的概念模型 (图 1), 并对该科学问题的内涵进行了揭示。

从 P - S - R 模型 (图 1) 可以看出, 公路工程与湿地生态系统的交互作用体现在 P - S - R 各个要素的相互作用和循环作用。湿地生态系统和公

收稿日期: 2008 - 08 - 26; 修订日期: 2009 - 01 - 05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973) (2003CB415104) 资助。

作者简介: 衷平 (1979 -), 男, 江西省景德镇人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事公路生态、湿地和水资源等方面研究。E-mail: zhongyuyue74@163.com

*通讯作者: 杨志峰, 教授。E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

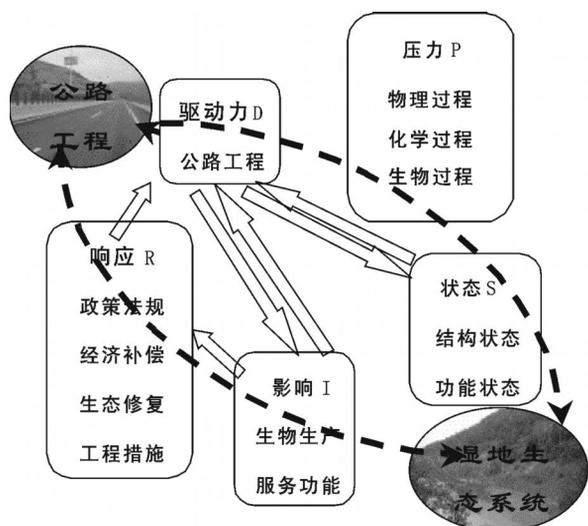


图 1 公路的湿地生态效应及其反馈的 P - S - R 模型示意图
Fig 1 The P - S - R modeling ecological effects and reactions of highway for wetland

路工程系统本身是两个相对独立的子系统,它们在整个区域生态系统中有着交互作用。但是在作用的过程之中二者逐渐演变,形成了一个新的生态平衡。在公路工程的湿地生态效应及其反馈机制的概念模型中各指标涵义如下。

“驱动力 指标 (Driving force): 公路工程。

“压力”(Pressure)指标: 公路建设与运营造成湿地生态系统一系列的物理、化学和生物变化。

“状态 指标 (State): 湿地生态系统的结构和功能状态,如湿地的系统结构、生物组成、栖息地面积、水文调节能力、水质净化能力等。

“影响 指标 (Impact): 湿地的湿地生物净生产力、生物产品产量及其对人类的材料供应和休闲娱乐功能等。“状态”和“影响”在本研究中可以看作湿地在公路作用下产生的生态效应。

“响应 指标 (Response): 制定湿地保护相应的政策法规、建设规划、工程措施、投资补偿措施等,如对工程本身进行约束防治措施,对在公路工程作用下的遭到破坏的湿地生态系统进行人工恢复或替代措施等,其实质正是湿地生态系统对公路工程的反馈。

首先,公路工程的建设即驱动力 D 给湿地生态系统造成了压力 P,然后湿地生态系统在压力 P 的作用下开始产生一系列的变化,主要包含湿地结构和功能状态的变化及其对人类的服务功能的变

化,即状态 S 和影响 I 都产生变化,从而产生了公路对湿地的生态效应。而公路管理、营运部门作为产生压力的源头,需要对湿地生态系统状态的改变负责,应根据状态的变化做出相应的措施,这样就产生了 S 和 I 的变化对驱动力 P 的反馈作用(响应 R),这一反馈(响应)将会调整公路环境系统的压力,进而调整系统的状态趋于健康稳定,使循环达到一个新的平衡。

由此可以看出,公路的湿地生态效应评价指标体系的框架模型与压力—状态—响应框架模型相似,是从工程压力、湿地状态和响应 3 个方面去研究公路与湿地生态系统。公路建设、公路运输等活动构成了系统的压力;湿地水文、水质状况以及生态结构和服务功能等构成了生态系统自身的状态;管理部门、营运部门、使用部门等构成了公路环境系统的响应。这样一个动态循环构成了整个公路工程的湿地生态效应及其反馈的概念模型。

2 公路的湿地生态效应的内涵

2.1 直接效应

公路是一个具有特定平面功能的线形构筑物,公路建设中占地必然导致湿地面积急剧下降,同时也会导致水文条件改变和水质污染的双重影响;更严重的是在湿地腹地肆意挖填阻隔,将会导致湿地破碎化,切断了湿地植被的天然联系,也切断了栖身湿地的鱼类和其他水生动物的洄游通道,妨碍了其繁殖或瓦解了其季节性的迁徙模式,因而构成了对湿地生物多样性的严重影响,许多湿地面临着干涸甚至已经干涸。湿地生态系统的破坏,意味着当地的生物支持力、稳定气候及生态平衡等都遭受到了严重的破坏,从而造成一系列的负面效应,对当地的经济和人民的生活造成不可估量的损失^[10-13]。

从以上分析可以看出,实质上公路的湿地生态效应主要是分多级效应逐级实施的。本文参考 Petts G E 对大坝生态效应的分级^[14],也将公路对湿地的直接生态效应看成由第一级 (First - order impacts)、第二级 (Second - order impacts) 和第三级效应 (Third - order impacts) 组成 (表 1)。第一级效应主要包括公路对湿地的水文和水质产生的效应,主要体现了公路对湿地的水文特征及水质产生的作用^[15,16]。国内外主要研究发现的源自于公路与车辆行驶的污染物主要有 23 种^[17]。

表 1 公路建设的湿地生态效应

Table 1 The ecological effect of road construction on wetland

效应等级	效应种类	压力 P	生态效应说明 (S和 D)
一级效应	湿地水文条件改变	公路桥梁和施工便道的占用和切割作用;弃渣等施工废料占用或切割湿地等。	·施工过程中淤塞或占用湿地,使湿地水流动态及特征(流量、流速或水位等参数)发生变化,进而影响到湿地自身的结构和生态服务功能。
	水质污染	施工污水以及生活污水的排放;施工弃渣或垃圾排入湿地;营运期服务区污水排放;路面径流入湿地等。	·加重湿地水流的污染负荷及污染程度,使水质恶化; ·对地表径流影响明显,路旁集水区净化功能减弱,水质变差(水质主要变化指标为 SS, COD, BOD, 石油类等)。
二级效应	湿地面积减少	路基、桥梁永久占用湿地;施工场地、临时公路、材料堆场、弃土场等临时占用湿地等。	·湿地被征用将造成该处湿地被永久清除,减少了湿地的面积,从而造成湿地一系列的水文和生态特征的变化; ·公路工程产生的泥沙有一部分会被流水带入流域的最低处,并且进入湿地,导致湖泊和沼泽湿地面积缩小,水库湿地库容减少等。
	湿地景观破碎化	主体工程中的公路桥梁的切割作用;施工便道、取弃土场等临时用地对湿地的割裂作用;公路修建产生的“廊道效应”等。	·维持湿地纵向和横向的连通性对于湿地中的许多物种种群的生命力是非常必要的,纵向和横向的连通性的丧失会导致种群的隔离以及鱼类和其他生物的局部灭绝; ·使湿地景观破碎,将湿地自然生境切割成孤立的块状,即湿地生境岛屿化,分割了湿地生物的活动领地; ·切断了湿地植被的天然联系,也切断了栖身湿地鱼类和其它水生动物的洄游通道,妨碍了其繁殖或瓦解了其季节性的迁徙模式,对迁徙动物产生屏障作用。
三级效应	洪水调蓄能力降低	公路建设中改变湿地形状或面积,产生的弃渣截断或堵塞水流,造成泥沙增多。	·影响湿地的洪水调蓄能力,增强洪水期的洪峰,降低旱季水位,对防汛能力有一定影响; ·增加湿地中的泥沙含量,抬高水位,使蓄水能力降低。
	栖息地质量变化	路基、桥梁、临时用地等占用和切割栖息地;弃渣或污水排入栖息地中	·栖息地面积发生变化; ·栖息地的连续性和稳定性发生变化,空间异质性降低; ·生物栖息的适宜性降低。
	湿地生物多样性减少	公路建设与运营影响了湿地的天然水流动态平衡,并降低了湿地的完整性和连通性	·水生生物的完整生长史直接响应于天然水流动态,水流动态的改变会导致土著物种多样性的丧失; ·完整性和连通性的丧失会导致种群的隔离以及鱼类和其他生物的局部灭绝; ·对迁徙动物的屏障作用直接导致物种多样性的减少。

第二级效应包括公路对湿地面积、形态、景观等的变化产生的效应,主要是由于湿地的水文特征和水质发生变化导致了湿地面积萎缩、形状变化,其景观破碎化程度也随之增大^[18-20]。

第三级效应主要指水生生物发生变化。随着湿地自身的结构和功能特征发生改变,其提供给生物生存及栖息的环境也从而改变,由此造成生物多样性的锐减等多项生态服务功能的降低甚至丧失。荷兰的 Vos C C对湿地区域蛙类出现机率与湿地

周围 750 m 范围内公路的密度的关系的研究表明,对于平均公路密度,沼泽蛙 (*Rana arvalis*) 出现的可能性为 82%,而当公路密度最大时蛙类出现的机率仅为 5%^[21]。Findlay和 Houlahan揭示了公路对湿地多样性的景观水平的影响,湿地面积与物种多样性之间存在强烈相关性,鸟类、两栖类、爬行类和植物的物种丰富度与湿地附近公路密度显著负相关^[22]。

三级效应是逐级递进的,但各级效应又互相相

关。各级效应及说明见表 1。

由国内外公路对湿地的直接生态效应研究可见,国外对该项内容研究较多,主要包括以下 4 个方面: 公路对湿地水文水资源变化产生的效应;

公路对湿地水质变化产生的效应; 公路对湿地结构和景观变化产生的效应; 公路对湿地生态功能和水生生物的生态效应。研究方法主要有野外实验观测法、湿地模型算法、遥感和 GIS 等方法^[15~22]。但是目前研究基本上是针对单条公路和个体湿地生态系统,对于公路网对区域湿地生态系统的作用研究相对较少,尤其在国内外相关定量化研究基本尚未开展。由于国家公路网的科学规划以及区域湿地生态保护都属于国家重大科技课题范畴,能够解决国家重大需求、为政府决策提供技术支持,因此将单条公路拓展到公路网,将单个湿地拓展到区域湿地生态系统,研究公路网对区域湿地产生的生态效应是进一步发展的方向。

2.2 间接效应

在生态效应研究中,最重要的一点就是区别直接效应和间接效应,直接效应易于发现容易观测,间接效应则不是很显著而往往被忽视^[23]。间接效应的研究是随着生态系统生态学的进展而发展起来的^[24],间接效应比直接效应的影响更大,作用范围更广、作用形式更多变而且作用持续时间更长。

公路建设的间接生态效应主要指公路建设通过影响周边地区的经济、文化、观念和 policy 等,间接地改变政策导向和人类的行为方式,进而引起更为复杂的环境、生态问题。公路对湿地的间接生态效应主要体现在以下几个方面。

(1) 公路的开通使沿线地区的人流和物流强度增加,速度加快,同时也扩大了人类活动范围,使许多原本难以到达或难以进入的地区变得可达和易于进入,这对湿地珍稀资源的保护构成巨大的威胁^[25];同时,公路建设为捕捞、垂钓等活动深入自然环境内部提供了通道,为人们进入原本进入不了的湿地进行开发活动提供了条件,因此进一步加剧了湿地的生态变化。

(2) 公路建设将导致人口、工业等经济要素的重新布局,使得沿线区域的交通变得便捷,将使得部分居民向路边区域迁移,也将导致人口的重新分布。因此,公路建设对人口和城镇化产生影响,而在城镇化发展过程中人们会占用或利用部分湿地,改变湿地用途,造成湿地面积的减少。使其由自然

环境变为人造环境,并产生大量污染物,对湿地生态环境产生了潜在威胁^[26~28]。

(3) 公路网络可能通过改变流域的水文条件、营养物流动或者野生动物的分布格局,从而在更大景观尺度上影响湿地^[29]。相关研究表明,通常湿地最重要的作用不是由单个湿地发挥的,而是许多湿地的综合效应。也就是说,湿地常常形成内部整体性来发挥作用,有时候其中一个消失会影响整体的完整性^[30]。流域上游湿地的损失率与流域洪水的增长率之间存在显著相关性,湿地损失的程度也与流域污染物的输出和下游获得的营养物呈现显著的相关性^[30]。

(4) 公路建设还造成了沿线娱乐、旅游业的发展^[31,32]。公路建设具有一定的聚集效应,随着公路的修建和车流量的增加,将有越来越多的商铺、旅游者和娱乐设施在路边区域发展壮大,从而繁荣了公路沿线区域的经济。由于天然湿地自然景观对于游人具有很大的吸引力,公路延伸将导致大量旅游者更为容易的进入原本没有涉足的自然湿地环境中,这样必将对沿线湿地生态环境造成扰动,对其产生显著影响。

总之,公路的修建导致了人类活动能力的显著增强,人类生态影响范围将迅速扩大,沿线湿地生态系统将受到较大扰动,其水文条件、水质、生态结构及生态服务功能(洪水调蓄能力、生物栖息地质量、生物多样性)等都将发生巨大改变,较大地加剧了公路对湿地的直接生态效应^[33~36]。

对于公路对湿地间接效应的评价目前研究较少,也没有比较成熟的评价方法,主要原因有以下几方面。

(1) 间接效应没有直接效应明显,因此难以获取有效的数据支持,从而也提高了评价难度;

(2) 间接效应变化所涉及的因素较多,其产生原因较直接效应更为复杂,公路对湿地产生的间接效应仅仅是湿地生态效应的一部分,如何将公路因素从其他原因中分离出来也是较大的难点;

(3) 体现间接效应往往需要较大的时空尺度,需要长时间的数据资料以及大尺度的评价,因此在短时期以较小尺度下难以有效地对其评价。

采用遥感和 GIS 方法模拟公路与湿地的变化情况,有效获取大尺度和长序列的数据,结合湿地生态模型及其他相关水文模型、经济学模型法等进行综合评价是公路对湿地间接效应研究进一步发

展的方向。

2.3 累积效应

效应的累积性研究重视的是自然生态系统变化的过程及其在环境方面产生的生态后果。累积涵义归纳起来是指“当一个项目产生的效应与过去、现在和将来可以预见的项目产生的效应在时空过程中进行叠加时会对生态环境产生综合效应^[37,38]。累积表现在时间和空间上,如时间拥挤型(time crowding)、时间滞后型(time lag)、空间拥挤型(space crowding)、交叉边界作用(cross-boundary movement)等^[39]。

目前,公路对湿地的累积效应逐渐为人们所认识,但尚未给出明确的概念和分类。本文认为公路的湿地环境累积效应的概念是:“由于公路建设和运营导致的湿地环境变化在时间和空间上与自然生态系统相互作用过程中产生的累积影响”。公路建设影响区域内的湿地不仅受到一个公路工程的影响,而是受到多个公路工程的累积作用,这些累积效应不是简单的叠加,而是一个非常复杂的相互作用和影响最后导致多方面平衡的一个过程。此外,随着公路运营时间的增加,累积性在湿地的三级效应内都分别有所体现。

公路对湿地的累积生态效应主要体现在时间累积和空间累积两方面。

(1) 时间累积效应。公路从修建开始,历经施工期和运营期,产生对湿地的环境要素频繁而反复的作用,如施工和运营期间废水连续排入湿地之中,除了部分污染物逐渐被降解之外,其它有很大一部分残留在湿地环境中,经过长期积累必然产生时间“拥挤”,影响湿地的水质,从而进一步对湿地的生物栖息地功能及其生物多样性都产生不可逆转的影响。目前公路对湿地物种多样性损失的累积时滞效应已经有了研究^[40~44]。其中 Findlay C 和 Houlihan S 研究发现,目前湿地物种多样性应通过 30 a 或 40 a 前公路密度来精确计算,而不是通过现在的公路密度计算^[44]。由此推论,公路影响的时间累积效应大约是 30~40 a。这个结论揭示了公路建设对自然种群的影响存在大量的时间累积效应。因此减缓公路的现状生态影响应该在数年前就开始努力,针对公路当前生态影响的有效缓解措施应及早作出。在公路建设时不仅要看到当前可观测到的生态影响,而且要考虑未来数十年的生态影响。

(2) 空间累积效应。从当前的研究和过程实践中来看,由于交通部门在修建公路过程中逐渐理解了保护环境的重要性,因此在工程实践中采取一定的措施对环境进行保护。因此,单条公路对湿地的生态效应渐渐不明显。然而,并不是说单条公路的生态效应不明显就证明所有公路对湿地也没有什么影响。湿地生态环境有一个总承载力,一旦多条公路乃至公路网同时作用于某湿地,从而产生空间“拥挤”效应,即使每条路的影响都不很明显,但是其累积的效应是不可忽视的。

Findlay C 和 Houlihan S 的研究还揭示了公路密度与湿地物种多样性之间存在较强相关性^[44],而且是呈现显著负相关,并且认为公路密度的增加对于湿地物种多样性的影响等同于湿地本身一定面积的损失。这些结论显示了公路对湿地生态空间累积效应。

(3) 累积效应评价和度量。公路的湿地累积效应分析是其时间和空间上的累积做出解释,估计和预测过去的、现有的或计划的公路工程所产生的效应,选择与湿地可持续发展目标相一致的潜在交通建设发展行为的方向、内容、规模、速度和方式^[45]。累积效应分析应将空间分析范围扩展到公路对湿地的影响域范围之内,而非路域本身;时间上要尽量考虑长序列时间尺度,还要考虑湿地生态环境自身随时间的变化。

由于国内缺乏长期对公路影响域内的湿地进行定量监测,缺乏长序列基础数据,因此公路的湿地累积效应评价具有一定的困难。由于涉及到的时间范围和空间范围比较广泛,其变化难以定量表示,而且目前还没有较好的模型或方法进行定量模拟和预测。国外较多采用 GIS 与环境数学模型法相结合进行评价^[46~48],而国内有采用 GIS 法、环境数学模型法以及系统动力学方法进行梯级水电开发、港口建设、区域开发等产生的累积效应研究^[49~52],但公路对湿地的累积效应研究尚未开展。

在公路对湿地累积效应评价中,其湿地生态阈值的确定尤为重要。由于在公路工程建设和运营中,对湿地的生态作用持续叠加作用到一定程度后,会使湿地生态环境发生质的变化,如使湿地转变为其他生态系统并完全退化等,丧失原有的功能。因此存在一个临界点,超过它之后湿地就会发生质的转变。这个连续点当然并非一个点位值,而应是会一个范围内波动的阈值。找到这个临界阈

值,对于分析将来哪些公路项目是可接受的,应该如何规划、建设和管理都是有重要意义的。

参考大坝的累积效应研究^[53],公路的湿地累积生态效应可以通过累积度、累积区以及累积频率来度量,最终目标是:使累积程度最小化、综合影响最小化。累积影响最小化的含义包括以下几个方面:累积度最低。累积度反映了公路的湿地生态效应在时空尺度上的累积程度,累积度越低,公路工程建设对湿地生态环境系统造成的损害越小。

累积区最小。累积区的大小反映了公路的湿地生态效应在空间上的分布特征,累积区愈小,公路工程建设对湿地生态系统影响的范围就愈小。

累积频率最低。累积频率反映了公路的湿地生态效应在时间上的分布范围,累积频率越低,公路工程建设对湿地生态环境系统可能造成的影响就越小。

3 湿地对公路建设的反馈内涵

3.1 政策法规及生态补偿

湿地生态保护是一项长期的工作,国家和地方政府必须坚持可持续发展的原则,制定相应的湿地保护的法律法规,最大限度地防止工程对湿地生态地破坏。制定政策法规时既要有短期安排,又要有长期打算规划,而且在理论和实践中应具有可操作性。对于公路建设管理部门来说,应根据湿地生态的保护原则以及公路自身的发展需要制定科学而合理的公路网发展规划和相关湿地保护政策,从而减缓规划公路网对湿地生态环境的负面效应。由于社会经济发展的需要,对于在发展过程中确实无法避免的湿地生态负效应,则应该采取相应的生态补偿措施。

公路建设中的湿地保护政策法规及生态补偿主要体现在以下几个方面。

(1) 构建完善的交通环保法律体系,重视湿地保护及利用的综合政策体系构建,明确公路建设中湿地保护的社会责任,通过法律来规范工程规划、建设及运营中对湿地利用的行为,如公路设计中禁止穿越湿地保护区等相关规定。广泛采用社会公众参与政策,通过立法和相关制度建设搭建公众参与湿地保护的参与平台,利用社会力量增加湿地保护投入,并通过湿地保护信息公开制度加大社会监督力度^[54~55]。

(2) 交通建设和管理部门在明确公路管理部门

的责权范围基础上,建立相应的湿地保护管理机构,提高湿地保护管理效率。同时,重视通过管理制度的建立确保湿地保护政策的稳定性和可持续性。

(3) 公路建设在规划选线阶段就应绕避有重要生态价值的天然湿地,如水禽保护地、珍稀动植物保护地等。也应绕避关系国计民生的重要人工湿地,如优质水田、菜地、水源地、水产品养殖场、水库等;如必须通过湿地,应采取必要措施收缩填方路基的边坡,或在路线纵坡许可的条件下,尽量降低路基填方高度,以减少筑路对湿地面积的占用;对于一些重要的湿地资源,为避免对湿地水文状态的影响,尽量架设桥梁跨越^[56~59]。

(4) 湿地保护政策应具有综合协调功能。在公路工程建设时湿地保护政策手段选择上,既要重视法律和管理手段的应用,也要越来越重视通过市场、税收、补偿等经济手段处理公路建设中湿地保护和利用的各种利益关系^[60]。

(5) 生态补偿措施。

湿地生态补偿原则。对于公路建设存在一个湿地自然过程和生物多样性的“零净损失”的目标^[61~63]。实现该目标不仅要控制对现有湿地的占用和破坏,公路建设和管理部门也有责任通过恢复和重建以保证湿地面积的动态平衡。对于一些可以恢复的人工湿地,可以采取异地补偿的办法,即公路建设占用多少湿地的面积,就在附近补偿同样或大于所占面积的湿地,使湿地的生态功能尽量少受影响^[19]。

湿地生态补偿措施类型。一种措施是湿地自身的恢复,指对公路影响域内现存湿地进行完全的结构和功能恢复;另一种是异地湿地替代,指由于原区域湿地不可避免被破坏甚至消失,则在异地重新建设一个与原湿地生态结构和功能类似的湿地,湿地替代建设要尽量靠近原失去湿地的区域^[64]。

湿地生态补偿措施设计重要特征指标。水文特征,控制进出湿地水流的流量和流速非常重要,对湿地的生态结构和功能形成起着重要的先决作用;湿地自身的蓄水量、蓄水面积及水位也是决定湿地整体特征的重要指标。湿地生物种类及数量,体现了湿地的生物多样性及生物量特征,是决定湿地生态系统是否良好的重要指标。土壤类型,适宜的土壤将有助于湿地的形成以及生态功能的发挥,否则将事倍功半。土地可获得性,恢复湿地需要相对的土地面积,因此可获得的土地也是湿地

恢复的一个重要因素。恢复费用,湿地恢复要考虑费用问题,如果其恢复费用比公路建设时保护湿地的花费更大,则应考虑在公路建设时对该湿地予以保护而并非恢复^[65,66]。

3.2 恢复和保护技术措施

湿地对公路的反馈信息告诉了研究者如何有效地减缓和遏制湿地生态进一步恶化,由此公路建设者们逐渐明确了应该采取哪些有效的技术措施减少公路修建给湿地生态系统带来的危害。

(1) 湿地生态系统恢复是一项生物、生态与工程技术相结合的工作,实质上是一个非常复杂的生态工程。在恢复重建退化的湿地生态系统时,必须充分利用各自的优点,进行组装配套,使恢复重建的整体效益达到最佳。恢复技术措施不仅要满足理论上的可行性,还要在技术上具有可操作性。由于不同的公路建设所产生的生态效应有所差异,因此湿地生态系统的退化类型、退化过程及其退化机制也有所不同,其恢复重建的技术措施也将不同。应因地制宜,具体问题具体分析,在长期定位试验研究的基础上,总结经验,组装出具有可操作性的技术体系和恢复重建模式。目前,人工湿地建造的技术在国内外已经相对比较成熟,被广泛用于自然湿地的恢复和重建^[67-71]。

然而,湿地恢复目前主要是采取新建湿地面积等同于损失湿地面积的办法,但是面积仅仅是评估湿地生态条件和湿地重要性的一个属性。功能属性,如水力学、水边岸线的稳定、营养物供给、沉积和污染物保持、野生生物多样性和生产量等都是重要考虑因子^[65]。只有把湿地融入周围景观,尤其考虑水文特征,湿地工程才能发挥最大效应。

(2) 对湿地生态系统结构的保护技术措施。公路建设中产生的弃土、弃渣不得直接排入湿地;公路施工人员产生的生活污水和垃圾应作处理以后排放;桥梁施工时,桥梁钻孔灌注桩施工时的泥浆排放危害极大,应采取开挖泥浆池集中存放、集中处理。有条件改变施工方法的还应改变施工方法,从根本上采取主动措施,如改钻孔为开挖成孔等,从而优化施工方法防止桥梁施工污染湿地;对服务区或管理处的生活污水,靠近城市的应纳入城市污水处理管网,不靠近城市的应安装污水处理设备;施工材料,如沥青、油料、化学品等,不应堆放于湿地附近;当桥梁跨越湿地时,应对桥面排水系统进行专门的设计,以免桥面径流水污染湿地;当公

路流水可能污染附近湿地时,也应对排水系统做专门的设计,不得直接排入湿地等^[72-75]。

(3) 对湿地生态系统生态功能的保护技术措施。公路建设中保护湿地生物多样性的措施在公路设计、施工中必须创造条件,改变公路“廊道效应”的影响,创造公路两侧沟通的条件^[76];桥梁施工中尽量以一跨跨越桥梁的形式跨越湿地,或者专为水陆两栖动物设置的湿地上的桥涵通道,便于动物从河中、河滩、岸边通过。对于建桥湿地中有水生保护动物或鱼类时,在施工中应科学管理,优化施工方案,抓紧施工进度,尽量缩短水上作业时间;在大桥下部结构水下作业时,尽可能不采用爆破作业,以免造成对水生生物的直接伤害。对于路基应该下设涵洞,主要考虑公路对青蛙、昆虫等栖息地的影响,使湿地中的一些爬行类和昆虫类动物大规模、季节性的顺利迁移得到保证。公路施工阶段必须按照设计图施工;不容许扩大施工范围,侵占湿地面积;应加强对施工人员的教育,施工期间严禁对湿地动植物资源的开采和破坏^[77-80]。

4 结 语

本文从公路建设对湿地产生的生态效应出发,结合国内外的一些研究成果,明晰了公路的湿地生态效应及其反馈机制的概念与内涵,分析了公路对湿地的三级直接生态效应、间接效应和累积效应。此外,通过分析湿地生态保护和恢复的反馈要求,反过来要求对公路建设进行合理规划、设计和施工,使湿地生态系统与公路生态系统形成一个动态而且闭合的生态平衡,这样能够在公路建设过程中最大程度地保护湿地生态系统。本文试图为指导如何最大限度地减少公路建设对湿地生态的破坏,建设生态和谐的公路提供一种新的思路和实践途径。

在工程实践中,应根据实际问题探讨公路建设生态优化模式和方法。从工程方案选择、工程措施的采取以及湿地生态系统保护和恢复重建等方面提出公路建设与湿地生态系统相和谐的生态优化模式,并提出实现该模式的主要方法、途径和措施,在公路建设实践中真正做到湿地的生态保护。

参考文献

- [1] 孙乔宝,甄晓云. 高速公路建设对生态环境的影响及恢复[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(4): 68~72

- [2] 孙青,卓慕宁,朱利安. 论高速公路建设中的生态破坏及其恢复[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 210~212
- [3] Mitsch W J, Day J W. 2004. Thinking big with whole - ecosystem studies and ecosystem restoration—a legacy of H. T. Odum [J]. *Ecological Modelling*, 178: 133 - 155.
- [4] Van H D, Janssen W H, Van D L. 2003. The influence of road infrastructure and traffic on soil water and air quality[J]. *Environmental Management*, 31(1): 50 - 68.
- [5] 黄锦辉,李群,刘晓丽. 河南周口至省界段高速公路建设对生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 2002, 21(1): 74~79.
- [6] 刘世梁,杨志峰,崔保山,等. 公路对景观的影响及其生态风险评价——以澜沧江流域为例[J]. 生态学杂志, 2005, 24(8): 897~901.
- [7] 刘世梁,崔保山,杨志峰,等. 公路网络对澜沧江流域典型区土地利用变化的驱动分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(1): 162~167.
- [8] 麦少芝,徐颂军,潘颖君. PSR模型在湿地生态系统健康评价中的应用[J]. 热带地理, 2005, 25(4): 317~320.
- [9] 周林飞,许士国,孙万光. 基于压力—状态—响应模型的扎龙湿地健康水循环评价研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 205~213.
- [10] Jones J A, Swanson F J, Wemple B C, et al. 2000. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks[J]. *Conservation Biology*, 14(1): 76 - 85.
- [11] 赵春,国大非. 公路建设对生态环境的影响及防治对策[J]. 北方环境, 2003, 28(2): 35~36.
- [12] 赵勇,孙中党,吴明作. 高速公路建设项目对生态环境影响综合评价研究[J]. 安全与环境工程, 2003, 10(3): 27~31.
- [13] 魏凤虎,陈红,王卓娅. 高速公路建设期生态环境影响分析[J]. 辽宁省交高等专科学校学报, 2003, 5(2): 45~48.
- [14] Petts G E. 1994. Rivers: dynamic components of catchment ecosystems in Calow [C] // *The River Handbook Hydrological and Ecological Principles* Oxford: Blackwell Scientific Publications, 3 - 22.
- [15] Jones J A, Swanson F J, Wemple B C, et al. 2000. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks[J]. *Conservation Biology*, 14(1): 76 - 85.
- [16] Wemple B C, Swanson F J, and Jones J A. 2001. Forest roads and geomorphic process interactions[J]. *Cascade Range, Oregon Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 191 - 204.
- [17] Kobering N P. 1984. Sources and Migration of Highway Runoff Pollutants - Executive Summary [M]. VOL. 1. FHWA/RD - 84/057. Milwaukee, Wis: Federal Highway Administration and Rexnord EnviroEnergy Technology Center
- [18] Jassby A D G. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size[J]. *New measures of landscape Ecology*, 15: 115 - 30.
- [19] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, et al. 2002. *Road ecology: Science and Solutions*[M]. Des Plains, US: Inland Press, 3 - 397.
- [20] Winter T C. 2001. The concept of hydrologic landscape[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 37: 335 - 49.
- [21] Vos C C. 1997. Effects of road density: A case study of the moor frog [C] // *Canter K Habitat Fragmentation and Infrastructure*. Netherlands: Ministry of Transport, Public Works and Eater Management 93 - 97.
- [22] Findlay C. S, Houlihan J. 1997. Anthropogenic correlates of species richness in construction on adjacent lands[J]. *Conservation Biology*, 14: 86 - 94.
- [23] Krivtsov V. 2004. Investigations of indirect relationships in ecology and environmental sciences: a review and the implications for comparative theoretical ecosystem analysis[J]. *Ecological Modelling*, 174(1-2): 37 - 54.
- [24] Wootton J T. 2002. Indirect effects in complex ecosystems: Recent progress and future challenges[J]. *Journal of Sea Research*, 48: 157 - 172.
- [25] 赵康. 公路建设对湿地资源的影响与保护[J]. 公路, 2003, (2): 87~89.
- [26] John D, Julia L D. 2006. The impact of tourism and personal leisure transport on coastal environments: a review[J]. *Estuarine, coastal and shelf science*, 67(1-2): 280 - 292.
- [27] 张镜铨,阎建中. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响——以格尔木至唐古拉山段为例[J]. 地理学报, 2002, 57(3): 253~266.
- [28] 林建,邱卿茹,陈建安. 公路旁土壤重金属和类金属污染评价[J]. 环境与健康杂志, 2000, 17(5): 284~286.
- [29] France R L. 2002b. *Creating Wetlands: Design Principles and Practices for Landscape Architects and Land - Use* [M]. New York: Norton
- [30] Kusler J A, Willard D E, Hull H C. 1998. *Wetlands and Watershed Management: Science Applications and Public Policy* [M]. Beme, N. Y.: A association of State Wetland Management
- [31] Borrego C, Tchepele O, Barros N, et al. 2000. Impact of road traffic emissions on air quality of Lisbon region [J]. *Atmospheric Environment*, 34(27): 4 683 - 4 690.
- [32] 曹力媛. 高速公路建设的生态环境问题及对策研究[J]. 山西交通科技, 2002, (2): 7~8.
- [33] 闫德仁,许智,任天忠. 退化土地利用对土壤养分变化的影响[J]. 内蒙古林业科技, 1998, (2): 35~44.
- [34] 曹广民,李英年,张金霞,等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂的释放量[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 14~19.
- [35] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 300~302.
- [36] 秦明周. 红壤丘陵区农业土地利用对土壤肥力的影响及评价[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 71~75.
- [37] UNEP. 1989. Sustainable water development and management [J]. *Water Resources Development*, 5(4): 140 - 198.
- [38] Gagnon L, Chamberland A. 1993. Emission from hydroelectric reservoirs and comparison of hydroelectricity, natural gas and oil [J]. *Ambio*, 22: 568 - 569.
- [39] King A W. 1993. Considerations of scale and hierarchy [C] // *Woodley S, Kay J, Francis G Ecological integrity and the man-*

- agement of ecosystems Delray Beach, FL: St Lucie Press
- [40] Banks J E 1997. Do imperfect trade-offs affect the extinction debt phenomenon[J]. *Ecology*, **78**: 1 597 - 1 601.
- [41] Cowlshaw G 1999. Predicting the pattern of decline of African primate diversity: An extinction debt from historical deforestation [J]. *Conservation Biology*, **13**: 1 183 - 93.
- [42] Loehle W M, Li B L 1996. Habitat destruction and the extinction debt revised[J]. *Ecological Applications*, **6**: 784 - 89.
- [43] Tilman D, May R M, Lehman C L, *et al* 1994. Habitat destruction and the extinction debt[J]. *Nature*, **371**: 65 - 66.
- [44] Findlay C S, Houlihan J 1997. Anthropogenic correlates of species richness in construction on adjacent lands[J]. *Conservation Biology*, **14**: 86 - 94.
- [45] 袁兆华, 吕宪国. 湿地环境累积效应 [J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(9): 1 104 ~ 1 108.
- [46] Houlihan J E, Findlay S C, Jacobs L. 2006. Estimating the effect of road proximity on the road density - wetland diversity relationship - Distance decay of road effects [J]. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, OCT - NOV **38**(10 - 11): 308 - 313.
- [47] Houlihan J E, Keddy PA, Makkay K 2006. The effects of adjacent land use on wetland species richness and community composition [J]. *Wetlands*, **26**(1): 79 - 96.
- [48] McHugh O V, McHugh A N, Eloundou P M. 2007. Integrated qualitative assessment of wetland hydrological and land cover changes in a data scarce dry Ethiopian highland watershed [J]. *Land Degradation & Development*, **18**: 643 - 658.
- [49] 王波, 黄薇, 杨丽虎. 梯级水电开发对水生环境累积影响的方法研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2007, (4): 127 ~ 130.
- [50] 方秦华, 张珞平, 江毓武, 等. 基于水动力数值模型的港口规划累积影响评价 [J]. *环境污染与防治*, 2006, **28**(10): 764 ~ 767.
- [51] 陈剑霄. 区域开发累积环境影响及其全幕景分析法评价 [J]. *地下水*, 2007, **29**(2): 73 ~ 76.
- [52] 吴健, 曲文辉. 2002. 流域累积效应及其评估中存在问题的探讨 [J]. *上海环境科学*, **21**(7): 444 ~ 448.
- [53] Brismar A. 2004. Attention to impact pathways in EIS of large dam projects[J]. *Environ Impact Assess Rev*, **24**: 59 - 87.
- [54] Habitat R T T, Alexander L E 1998. Roads and their ecological effects[J]. *Annual review of ecology and systematics*, (29): 207 - 231.
- [55] 江玉林, 杜娟. 高等级公路生态环境保护问题与对策 [J]. *公路*, 2000, (8): 67 ~ 72.
- [56] Vemaat, J E, Goosen H, Omtzigt N. 2007. Do biodiversity patterns in Dutch wetland complexes relate to variation in urbanisation, intensity of agricultural land use or fragmentation? [J]. *Biodiversity and Conservation on Servation*, **16**: 3 585 - 3 595.
- [57] Warren M L, Pardew M G 1998. Road crossing as barriers to smallstream fish movement[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, **127**: 637 - 44.
- [58] 邓穗芬. 新台高速公路设计中的环境保护措施与工程实践 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2005, **16**(1): 63 ~ 65.
- [59] 睦封云, 李云科. 公路建设对自然保护区的影响及工程措施 [J]. *现代交通技术*, 2005, (3): 78 ~ 80.
- [60] 曹志平, 朱新松. 公路建设穿越湿地的环保对策 [J]. *交通环保*, 2003, (6): 20 ~ 21.
- [61] Cuperus R, Bakemans M G G J, Udode Haes H A, *et al* 2001. Ecological compensation in Dutch highway planning [J]. *Environmental Management*, **27**: 75 - 89.
- [62] Cuperus R, Canters K J, Piepers A A G 1996. Ecological compensation of the impacts of a road: Preliminary method for the A50 road link (Eindhoven-Oss, Netherlands) [J]. *Ecological Engineering* **7**: 327 - 49.
- [63] Cuperus R, Canters K J, Udo de Haes H A, and Friedman D S 1999. Guidelines for ecological compensation associated with highways [J]. *Biological Conservation*, **90**: 41 - 51.
- [64] Salvesen D. 1994. Wetlands: Mitigating and Regulating Development Impacts [M]. Washington, D. C.: Urban Land Institute.
- [65] Bartoldus C C, Garbush E W. 1994. Evaluation for Planned Wetlands (EPW): A Procedure for Assessing Wetland Functions and a Guide to Functional Design [M]. St Michaels, Md: Environmental Concern Inc.
- [66] France R L. 2002. Creating Wetlands: Design Principles and Practices for Landscape Architects and Land - Use Planners [M]. New York: Norton W. W. Quality and Company Publisher.
- [67] Frischenbruder T M, Pellegrino P. 2006. Using greenways to reclaim nature in Brazilian cities [J]. *Landscape and Urban Planning*, **76**(1 - 4): 67 - 78.
- [68] King R S, Nunnery K T, Richardson C J. 2000. Macro invertebrate assemblage response to highway crossings in forested wetlands: implications for biological assessment [J]. *Wetlands Ecology and Management*, **8**(4): 243 - 256.
- [69] 崔保山, 刘兴土. 湿地恢复研究综述 [J]. *地球科学进展*, 1999, **14**(4): 359 ~ 364.
- [70] 孙青, 卓慕宁, 朱利安. 论高速公路建设中的生态破坏及其恢复 [J]. *土壤与环境*, 2002, **11**(2): 210 ~ 212.
- [71] 孙乔宝, 甄晓云. 高速公路建设对生态环境的影响及恢复 [J]. *昆明理工大学学报*, 2000, **25**(4): 68 ~ 72.
- [72] Barrett M E, Jr Irish L B, Jr Malina J F, *et al* 1998. Characteristics of highway runoff in Austin, Texas, area [J]. *J. of Environ Engng ASCE*, **124**(2): 131 - 137.
- [73] Ellis J B, Deutsch J C, Mouchel J M, *et al* 2004. Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff [J]. *Science of The Total Environment*, **335**: 251 - 260.
- [74] 黄满红, 黄向京. 公路建设中的水环境问题与对策研究 [J]. *交通环保*, 2003, **24**(2): 23 ~ 26.
- [75] 王一斌, 邵坚达, 桂炎德, 等. 公路交通水污染防治技术的研究 [J]. *公路*, 2004, (1): 136 ~ 138.
- [76] Frey S N, Conover M R. 2006. Habitat use by meso - predators in a corridor environment [J]. *Journal of Wildlife Management*, **70**(4): 1 111 - 1 118.
- [77] Roe J H, Georges A. 2007. Heterogeneous wetland complexes,

- buffer zones, and travel corridors: landscape management for freshwater reptiles [J]. *Biological Conservation*, **135**(1): 67 - 76
- [78] David J P, Wesley J B. 2005. Effectiveness of stream restoration following highway reconstruction projects on two freshwater streams in Kentucky[J]. *Ecological Engineering*, **25**(1): 73 - 84
- [79] Mchugh O V, McHugh A N. 2007. Integrated qualitative assessment of wetland hydrological and land cover changes in a data scarce dry Ethiopian highland watershed [J]. *Land Degradation & Development*, **18**: 643 - 658.
- [80] 刘 苏,秦建新,魏晓芳. 基于 3S技术的公路建设影响洞庭湖湿地生态环境评价指标体系研究 [J]. *公路*, 2006, (1): 102 ~ 108.

Advance on Ecological Effects of Highway Construction on Wetland and Its Reactions

ZHONG Ping^{1,2}, YANG Zhi-Feng¹, CU I Bao-Shan¹, WANG Yun²

(1. *State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P. R. China*; 2. *Research Center for Environment Protection and Transportation Safety, China Academy of Transportation Sciences Ministry of Communications, Beijing 100029, P. R. China*)

Abstract: Highway construction is necessary for rapid economic development. Although highway construction could be an impetus for economic development, the construction itself and after traffic will certainly cause some negative impacts on wetland such as ecosystem fragmentation, disturbance, destruction and pollution. Also, wetlands inevitably are occupied or affected by highways which are one of the significant projects that takes much land. The researchers are currently proposing that wetlands will degenerate or shrink because that highways are going through or close to them, which is an issue drawing increasingly greater public concerns. The study on the relationship between highway and wetland changes was drawing increasingly greater attentions nowadays. The theory about ecological effects and reactions of highway construction for wetlands was discussed in this paper. Firstly, the ecological effects and reactions of highway construction for wetlands model were established based on "Pressure - State - Response" (P - S - R) modeling. Secondly, the content of ecological effects of highway construction for wetlands was discussed by referring some origin, development and trends of related research. It includes the direct effects, indirect effects and accumulative effects, and the direct effects have three levels. Some researchers have conducted studies on direct effects of highway on wetland's ecological environment, mainly focused on changes of water quantity and quality, wetland area, animal habitat and species diversity during the highway's construction. Moreover, some researchers indicated that besides direct effects, indirect effects and accumulative effects between highway and wetland's ecological changes within a long period of time should be paid more attention, and the truly response for the large-scale shrinkage and degeneration of wetlands might be the accumulated impact of the highway network over the years. Finally, the ecological reactions of wetlands under the highway construction were addressed, some guidance on alleviating negative effects to wetland ecosystems were given in the paper, and the technical support for ecological highway construction was provided. The guidance includes the policy, law scheme, economic compensation, the measure of resume and protection, and so on. The Ministry of Communications should maintain the ecological balance of the wetlands and highway network, and try their best to protect and resume the wetland ecosystems during highway construction.

Keywords: highway; wetland; ecological effect; reaction