2014-12-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2014.06003 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 Chin J Appl Environ Biol 2014, 20(6): 1039-1045

# 大相岭山系泥巴山大熊猫生境廊道设计*

侯 宁[1] 戴 强[2] 冉江洪[1**] 焦迎迎[1] 程 勇[3] 赵 成[1]
[1]四川大学生命科学学院生物资源与生态环境教育部重点实验室 成都 610065
[2]中国科学院成都生物研究所. 成都 610041
[3]四川省荥经县林业局 荥经 625200

**摘 要** 生境廊道是促进基因交流，避免生物小种群灭绝的有效手段. 大相岭是现存大熊猫栖息地面积和数量都很少的山系，泥巴山是大相岭大熊猫核心种群与邛崃山大熊猫种群的关键连接区域. 为了探讨大熊猫生境廊道的设计方法，促进泥巴山廊道的建设，有效保护大熊猫栖息地，利用全国第三次大熊猫调查（2000-2001年）资料和2011-2012年的野外调查资料，采用Maxent模型、Linkage mapper廊道设计软件和最小成本路径法（Least-cost path，LCP），对大相岭泥巴山大熊猫生境廊道进行设计. 研究结果显示：所设计廊道位于海拔1 400-3 000 m，宽度设置为2 250 m，长度为15.76 km，面积为38.5 km$^2$. 廊道内部植被以阔叶林、灌丛和针叶林为主；其中 74.19%的面积为相对适宜栖息地，25.29%的面积为不适宜栖息地，0.52%的面积为适宜栖息地. 本研究表明，廊道内部适宜栖息地所占的比例非常小，需要对廊道进行改造并加以保护，使不适宜的栖息地转变为适宜栖息地，保障大熊猫的顺利通行. 图5 参34

**关键词** 大熊猫；廊道；栖息地；Maxent模型；大相岭
**CLC** Q959.838.8

# A corridor design for the giant panda in the Niba Mountain of China*

HOU Ning[1], DAI Qiang[2], RAN Jianghong[1**], JIAO Yingying[1], CHEN Yong[3] & ZHAO Cheng[1]
[1]*Key Laboratory of Bio-Resources and Eco-environment of Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University*, Chengdu 610064, China
[2]*Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences*, Chengdu 610041, China
[3]*Forestry Bureau of Yingjing County*, Yingjing 625200, China

**Abstract** Habitat corridor is an effective way to enhance gene communication, and avoid extinction of small populations. The Niba Mountain, as a part of the Daxiangling Mountains, is the key area to connect the central populations of the giant panda in the Daxiangling Mountains with the populations in the Qionglai Mountains. In order to research the design method of the corridor for the giant panda and promote the construction of the Niba Mountain corridor, we designed a giant panda habitat corridor in the Niba Mountain based on the third national survey on the giant panda (2000-2001) and field survey data from 2011 to 2012. Maxent model, Linkage mapper corridor design software, and a least-cost path model (LCP) were used to design the corridor. The habitat corridor to build is 2 250 m in width and 15.76 km in length, covering an area of 38.5 km$^2$ and distributing between the altitudes of 1 400 m and 3 000 m. Vegetation types of the corridor are mainly broad-leaved forests, shrubs, and coniferous forests. Most of the areas are moderately suitable and unsuitable habitat, accounting for 74.19% and 25.29%, respectively, of the total area. Only 0.52% is suitable habitat. Therefore, to ensure smooth passing-through of the giant panda, the designed corridor needs further transformation and protection to increase the area of suitable habitat.

**Keywords** giant panda; corridor; habitat; Maxent model; Daxiangling Moutains

随着人类活动的加强，动物生境破碎化程度越来越高，这已成为一个世界性的普遍现象[1]. 廊道是指景观中与相邻环境不同的线性或带状结构[2]. 生境廊道是廊道的一种应用类型，在功能上把曾经连为一体但因破碎化而产生的2个或多个植被斑块连接起来，并有利于动植物在这些植被斑块之间运动[3]. 已有研究表明，生境廊道可以促进物种在破碎化斑块之间的扩散和移动[4]，防止种群隔离，维持种群数量[5]，增加物种基因流动[6]以及保护生物多样性[7].

大熊猫（*Ailuropoda melanoleuca*）是中国特产的珍稀濒危动物，由于强烈的人类干扰，大熊猫现孤立地分布在川、甘、陕的6个山系内[8]，其中，大相岭山系是现存大熊猫栖息地面积最小、数量最少的山系，仅有大熊猫数量14只[9]. 由于国道108线南北向穿过大相岭泥巴山区域，国道两侧植被破坏严重，人类干扰活动频繁，造成了大相岭大熊猫栖息地的分隔，增大了国道两侧大熊猫基因交流的难度，导致了隔离小种群的形成，泥巴山区域也就成为大相岭山系大熊猫东部核心种群与邛崃山系种群的关键廊道区域[8, 10-13]. 因此，在该区域进行廊道建设研究是十分必要的.

收稿日期 Received: 2014-06-03 接受日期 Accepted: 2014-07-01
*国家林业局国际合作项目和四川省林业厅四川省第四次大熊猫调查项目资助 Supported by the International Partnership Program of State Forestry Administration and the Forth Survey on the Giant Panda of Sichuan Forestry Department
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: rjhong-01@163.com)

为了有效地的保护大熊猫及其栖息地，建立大熊猫生境廊道一直受到广泛的关注，并且已经开展了部分探索研究工作. 2007年，在世界自然基金会的支持下，在连接大熊猫岷山A、B种群的土地岭区域最早开始了大熊猫生境廊道建设的探索工作，对廊道建设的可行性、设计方法、建设和管理方案等进行了探讨[14-15]. 齐敦武等采用生境因子分析模型预测了小相岭山系大熊猫适宜栖息地分布，并使用最小代价路径法（Least-cost path，LCP)确定了小相岭山系大熊猫生境廊道[16]. 然而，这些研究都仅指出了廊道的大致位置，没有提出大熊猫廊道建设的量化指标（包括廊道宽度、长度），还缺乏实际建设的指导性和针对性. 大熊猫生境廊道究竟应如何建设？目前还缺乏相关的文献报道. 本文利用全国第三次大熊猫调查（2000-2001年）的大熊猫痕迹点和2011-2012年对泥巴山及周边区域植被的调查数据，对大相岭泥巴山大熊猫生境廊道进行设计，以期为泥巴山大熊猫生境廊道的建设提供依据，为其它区域大熊猫生境廊道的设计提供借鉴.

## 1 研究区域概况

大相岭泥巴山大熊猫生境廊道区域位于四川省雅安市荥经县境内，108国道从北向南穿过. 由于国道两侧的植被破坏和强烈的人类干扰，在全国第二次、第三次大熊猫调查时整个区域都没有发现大熊猫活动痕迹，东西部大熊猫痕迹点的最近距离为37.5 km，因而泥巴山被划分为连接大熊猫大相岭种群与邛崃山种群的关键廊道区域[8-9]. 荥经县幅员面积1 781 km$^2$，海拔700-3 666 m. 植被带谱为：海拔1 500 m以下为常绿阔叶林带，1 500-2 500 m为针阔叶混交林带，2 500 m以上为针叶林带[17].

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

廊道设计使用的大熊猫痕迹点来源于全国第三次大熊猫调查数据. 植被和竹种分布数据来源于2011-2012年的实地调查数据和全国第三次大熊猫调查数据.

### 2.2 数据分析

**2.2.1 大熊猫栖息地质量评价** Maxent模型是使用物种的出现点数据和背景环境变量分析物种的生态位范围及限制因子，预测其地理分布模式的模型[18]. 该模型采用Jackknife检验对环境因子重要性进行分析，并通过受试者工作特征曲线（Receiver operating characteristic，ROC）进行模型准确度诊断，ROC曲线下面积（Area under curve，AUC）可以对Maxent模型的精度进行评价，AUC值越大，表示环境变量与预测物种地理分布模型之间相关性越大. 利用Maxent模型对大熊猫栖息地进行适宜性评价时，生境适宜度指数（Habitat suitability index，HSI）最高为1，最低为0. 基于最大约登指数（Youden's index）找到最佳中断点，确定适宜栖息地[19]. 基于阈值确定相对适宜栖息地[20].

Maxent模型分析所用环境数据包括地形数据（10个变量）、植被类型（13个变量）、竹类分布数据（1个变量）. 地形数据来源于中国科学院科学数据库分辨率为30 m × 30 m的数字高程图（DEM：1:100000），提取海拔、坡度和坡向3个地形因子，坡度划分为平坡（0°-5°）、缓坡（6°-20°）、斜坡（21°-30°）、陡坡（31°-40°）及坡度＞41°共5类，坡向划分为阳坡（157.5°-247.5°和67.5°-157.5°)、半阴半阳坡（247.5°-337.5°）、阴坡（337.5°-360°和0°-67.5°）及无坡向共4类，作为分类变量进入分析. 在ArcGIS 10.0中运用空间分析制作10个地形变量（海拔、5类坡度、4类坡向）图层. 采用2009年landsat TM卫星照片，在ERDAS 9.0软件中利用野外调查的植被数据进行解译，做成植被解译图. 根据《中国植被》确定寒温性针叶林、温性针叶林、落叶阔叶林、常绿落叶阔叶林、常绿阔叶林、常绿灌丛、灌草丛、落叶灌丛、草甸、农耕地、栽培森林植被、湿地、裸地等13种类型[21]. 在ArcGIS 10.0中运用重分类工具分别制作13个植被型变量图层. 根据全国第三次大熊猫调查和2011-2012年调查的有竹和无竹点，制作竹类分布图层. 对13个植被型变量和1个竹类变量进行直线距离分析，得到栅格图层.

将在全国第三次大熊猫调查中获得的64个大熊猫痕迹点和24个环境变量图层导入Maxent模型中，随机选取其中75%的痕迹点作为训练集，25%的痕迹点作为验证集. 利用Maxent模型分析得到的HSI对大熊猫栖息地进行适宜性评价，划分为适宜、相对适宜和不适宜3个等级，生成大熊猫适宜栖息地分布图.

**2.2.2 大熊猫生态廊道构建** 在大熊猫适宜栖息地分布图基础上，利用ArcGIS圈划出适宜栖息地所包含的所有斑块. 考虑到大熊猫的家域面积为3.9-6.2 km$^2$ [22]，采用4 km$^2$ 作为圆形区域的面积，半径为1 125 m [23]. 通过空间分析工具将面积小于4 km$^2$，且距离其他栖息地大于1 125 m的单个栖息地剔除，及大面积栖息地中间的一些小于4 km$^2$的空洞（大熊猫栖息地中的一些面积很小的非栖息地斑块，比如偶然出现的悬崖、或者其他的不利因素）剔除，得到大熊猫核心栖息地.

利用Maxent模型分析得到的栖息地预测结果建立阻力图层，阻力通过HSI值进行栅格计算[24]. 阻力图层的每一个栅格值反映的是当物种经过该单元格时遇到的障碍，值越大，说明障碍越大，花费越大. 阻力值由单元格的植被、地形等综合决定. 将Maxent模型分析得到的栖息地预测结果在ArcGIS 10.0中做进一步分析，把预测图层转换为栅格图层，对其HSI值进行栅格计算，得到阻力图层. 将大熊猫核心栖息地图层、阻力图层共同导入Linkage Mapper中计算最小成本路径. 基于大熊猫最小家域4 km$^2$的假设，确定廊道最小半径为1 125 m，以此为廊道最小宽度. 以Linkage Mapper计算得到的最小代价路径为廊道中心线，以廊道最小宽度1 125 m做缓冲分析得到廊道范围.

## 3 结果

### 3.1 大熊猫栖息地质量评价

**3.1.1 大熊猫生境与环境因子的关系** Maxent模型ROC分析表明，训练数据AUC平均值达0.964，验证数据AUC平均值达0.899，具有良好的判断效果. 根据Jackknife分析，海拔、寒温性针叶林、竹子、耕地、栽培森林植被、湿地、裸地等7个变量是影响大熊猫栖息地分布的主要环境因子（图1）.

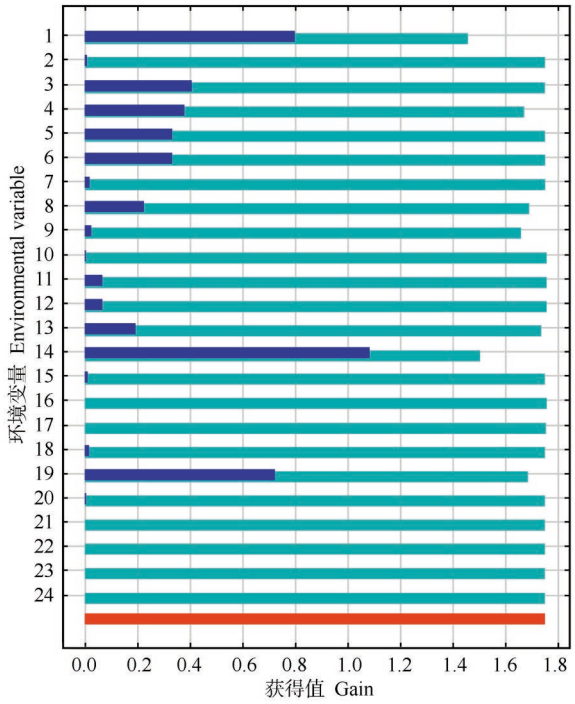


**图1 环境变量Jackknife分析.** 蓝色表示变量单独对预测的增益，浅蓝色条带的长度代表除该变量外的其它所有变量对模型预测的增益，红色表示所有变量进入模型后的增益. 1：寒温性针叶；2：草甸；3：农耕地；4：栽培森林植被；5：湿地；6：裸地；7：温性针叶林；8：落叶阔叶林；9：常绿阔叶和落叶阔叶混交林；10：常绿阔叶林；11：常绿灌丛；12：灌草丛；13：落叶灌丛；14：海拔；15：半阴半阳坡（67.5°-157.5°，247.5°-337.5°）；16：无坡向；17：阳坡（157.5°-247.5°）；18：阴坡（0-67.5°、337.5°-360°）；19：竹子；20：坡度＞41°；21：陡坡31°-40°；22：缓坡6°-20°；23：平坡0°-5°；24：斜坡21°-30°.

**Fig. 1 Jackknife analysis of environmental variables.** Blue: gain with single variable; Light blue: gain without variable; Red: gain with all variables. Environmental variables are 1: cold-temperature coniferous forest; 2: meadow; 3: cultivated land; 4: planted trees; 5: wetland; 6: bare land; 7: temperate coniferous forest; 8: deciduous broad-leaf forest; 9: evergreen broad-leaved and deciduous broad-leaved mixed forest; 10: evergreen broad-leaved forest; 11: evergreen shrub; 12: shrub grass; 13: deciduous shrub; 14: altitude; 15: semi-sunny aspect and semi-shady aspect (67.5°-157.5°, 247.5°-337.5°); 16: no aspect; 17: sunny aspect (157.5°-247.5°); 18: shady aspect (0-67.5°, 337.5°-360°); 19: bamboo; 20: slope >41°; 21: steep slope 31°- 40°; 22: gentle slope 6°-20°; 23: flat slope 0°- 5°; 24: dip slope 21°-30°.

3.1.2 **大熊猫适宜栖息地分布** 依据Maxent模型最大约登指数，找到最佳中断点为0.3，确定大熊猫适宜栖息地，基于阈值判断最佳中断点为0.01，确定相对适宜栖息地. 依据栖息地适宜性划分原则，HSI > 0.3的为适宜栖息地，0.01 < HSI < 0.3为相对适宜栖息地，0 < HSI < 0.01为不适宜栖息地. 计算得出研究区域内大熊猫栖息地面积为743.22 $km^2$，占研究区总面积的41.73%，其中相对适宜栖息地面积为564.22 $km^2$，占总栖息地面积的75.92%，适宜栖息地面积为179 $km^2$，占24.08%（图2）.

## 3.2 大熊猫廊道构建

基于大熊猫适宜栖息地分布图，使用ArcGIS空间分析工具划分核心栖息地范围（图3）. 基于核心栖息地的划分，利用阻力栅格图层和Linkage mapper构建大熊猫廊道，构建的廊道宽度设置为2 250 m，长度为15.76 km，面积为38.5 $km^2$（图4）.

构建的廊道位于海拔1 400-3 000 m，廊道内部多为相对适宜栖息地和不适宜栖息地，分别占廊道总面积的74.19%和25.29%. 植被以阔叶林、灌丛和针叶林为主，分别占廊道总面积的59.95%、28.05%和10.91%（图5）. 廊道内有108国道穿过，长度为2 830 m，海拔为1 830-2 100 m. 区域内建设有3个水电站，附近有2个采矿点，主要的人类活动干扰有采笋、其它非木材林产品采集（包括采药、采食用菌、采野生蔬菜等）及放牧.

# 4 讨论与结论

对大熊猫栖息地进行质量评价，不同学者采用了不同模型，例如生境结构理论模型[11, 25-26]，景观连接度及适宜性评价模型[12]，生境因子分析模型（Ecological Niche Factor Analysis model, ENFA）[16]，最大熵模型（Maxent模型）[27]等. 自最大熵模型发展以来，被广泛接受并使用，是目前在野生动物生境预测与评价中被应用最普遍的方法之一.

在做廊道设计时，核心栖息地的划分非常重要. 不同的划分标准会得到不同的结果，如直接采用大熊猫痕迹点和采用成片的适宜栖息地来确定，得到的结果会不一样. 本文采用成片的适宜栖息地边界来作为核心栖息地边界的划分标准，与陈利顶等曾在卧龙自然保护区，基于景观适宜性评价图，利用ArcGIS圈划出景观适宜地区组成的所有潜在斑块作为核心栖息地一样[28]，这样划分比直接用大熊猫活动痕迹点划分要减少廊道距离.

廊道的宽度对于廊道生态功能发挥着重要的影响. 一般认为廊道越宽越好[29]，太窄的廊道对敏感物种不利，同时降低廊道对污染物的过滤功能. 随着廊道宽度的增加，环境异质性增加，边缘种和内部种增加. 廊道宽度在很大程度上影响产生边缘效应的地区，进而影响廊道中物种的分布和迁移. 边缘效应虽然不能被消除，却可以通过增加廊道的宽度来减小[30]. 但是，过宽的廊道会增加生物在廊道两侧内部的运动，降低生物到达目的地的效率[31]，并需要更多的土地而增加与土地所有者的利益冲突[32]. Harrison提出了用“最小宽度”来设定生境廊道的规模，即根据保护物种的行动圈大小来确定廊道的最小宽度，宽度等于行动圈直径[33]. 大熊猫的家域面积为3.9-6.4 $km^2$ [22]，采用4 $km^2$作为行动区的面积，直径为2 250 m. 本文规划廊道时采用2 250 m作为廊道宽度的最低限值. 在实际建设廊道过程中可根据廊道周围的地形、土地利用情况适当拓宽.

从设计廊道内部栖息地质量看，有一些不适宜栖息地，且适宜栖息地所占的比例非常小，需要对廊道进行改造并加以保护，使不适宜的栖息地转为适宜栖息地，保障大熊猫的顺利通行. 现就廊道保护措施提出3点建议：

（1）降低人为干扰. 雅攀高速泥巴山隧道的建成通车，使108国道的车流量逐渐减少，降低了108国道对廊道的影响，对泥巴山廊道的建设具有正面效果. 但廊道区域仍然存在许多人类干扰活动，需严格控制在廊道内的挖药、采笋、非木质林产品采集等干扰大熊猫活动和栖息地的行为，如限

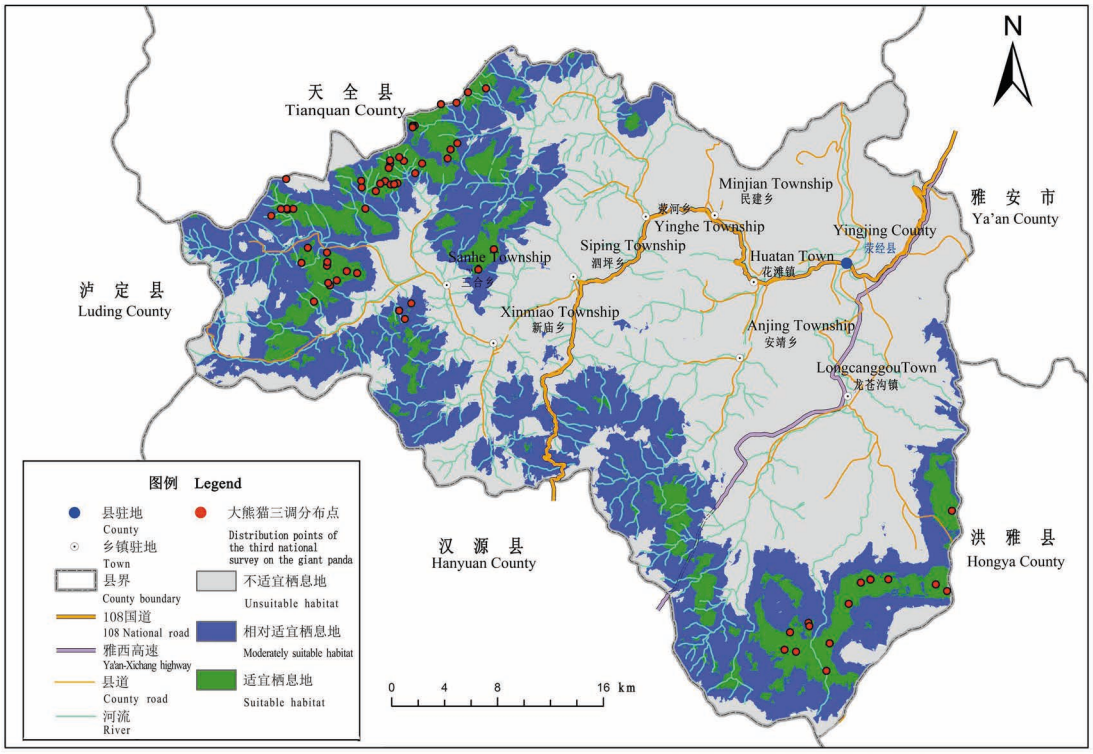


**图2 大熊猫适宜栖息地分布.**
**Fig. 2 Distribution of suitable habitat for the giant panda.**

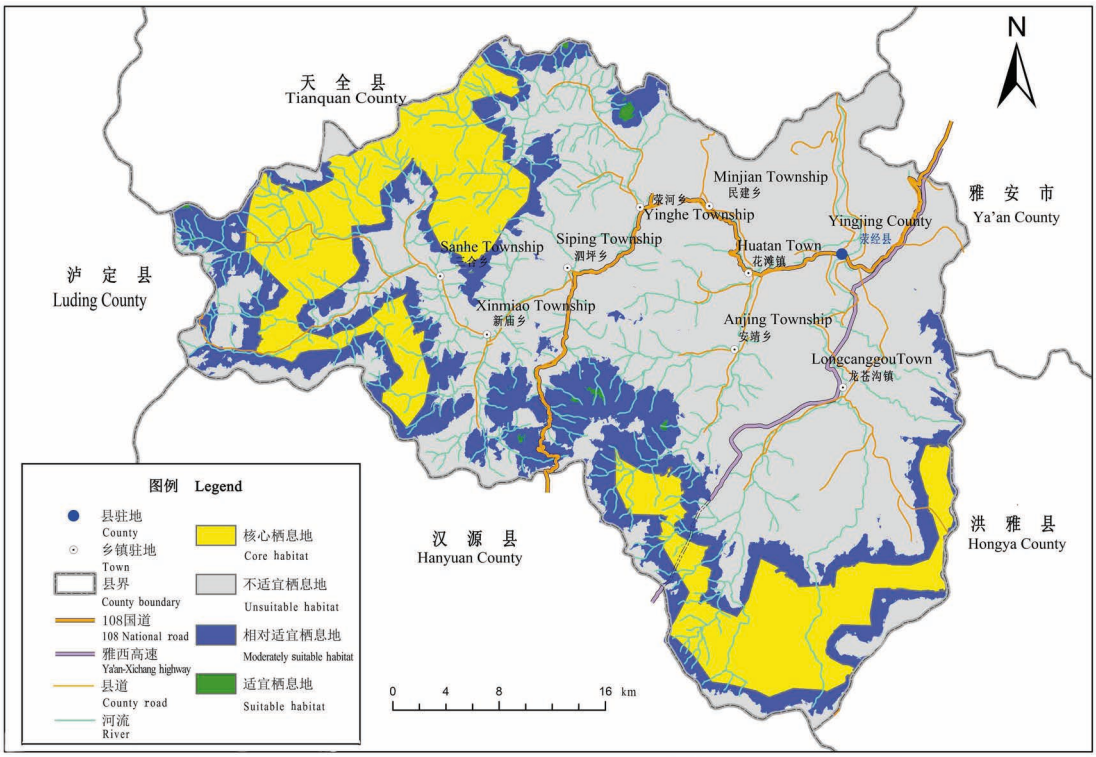


**图3 大熊猫核心栖息地.**
**Fig. 3 Core habitat area for the giant panda.**

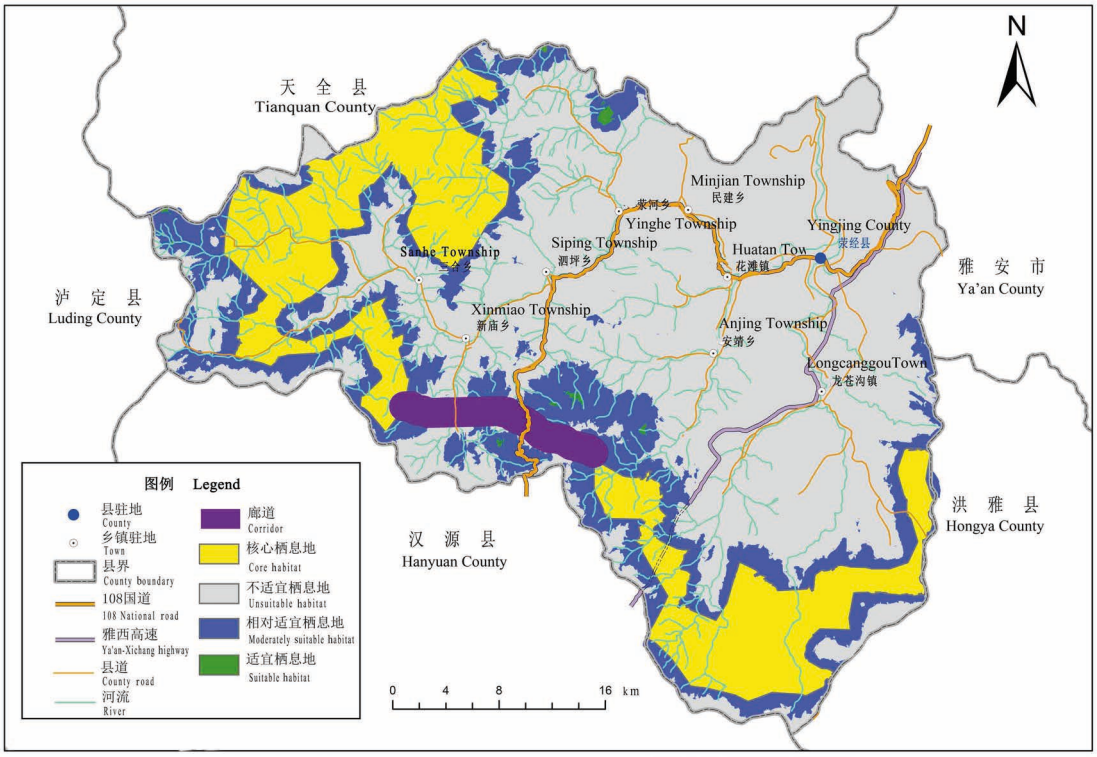


**图4 大熊猫廊道位置.**
**Fig. 4 Location of habitat corridor for the giant panda.**

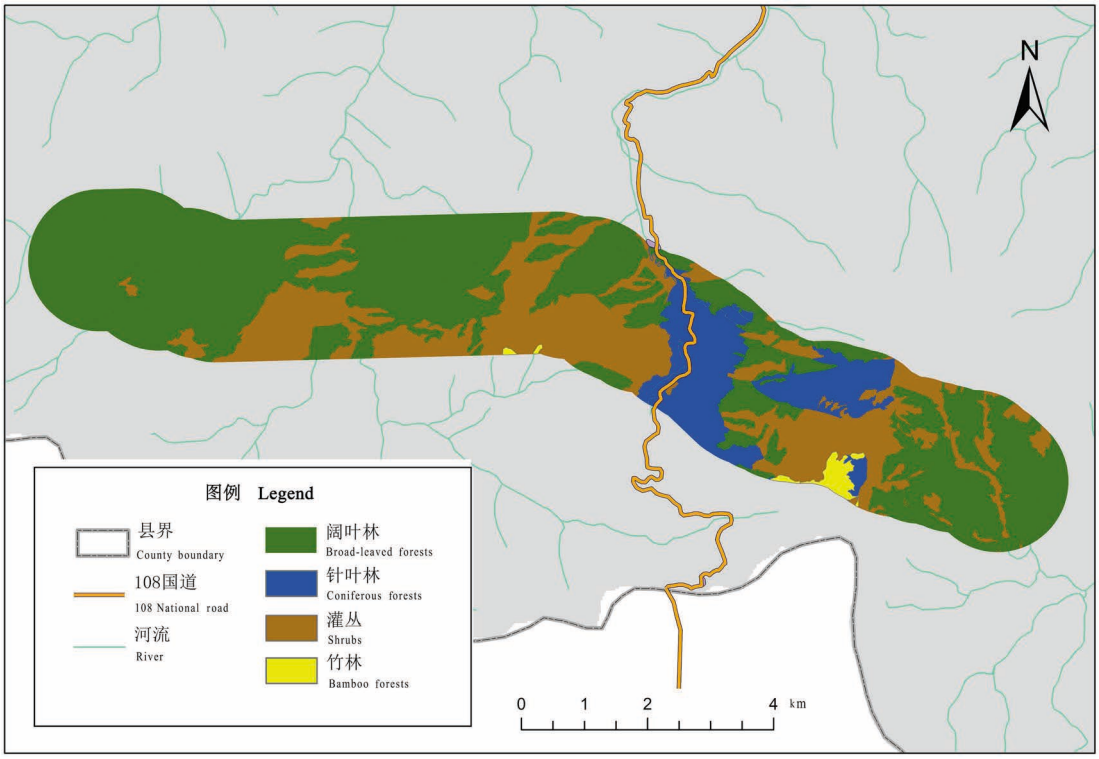


**图5 廊道内植被.**
**Fig. 5 Vegetation in the corridor.**

制采笋的人员、数量，以及采笋的时间和地点等. 禁止在公路两旁建设新的固定建筑设施，尽力减少人为活动对该地区造成的威胁.

（2）栖息地植被恢复. 由于历史的森林砍伐，廊道内的植被主要以次生植被和人工植被为主，灌丛占了较大面积. 对于现有植被还需要进行改造和重造林，以满足大熊猫生活的需求. 现有廊道内的竹类分布面积较少，竹类资源分布限制大熊猫的分布[34]，因此在植被改造和造林时，重点要营造竹林，以使其能尽快地恢复成大熊猫可利用的生境.

（3）在廊道建设和管理中积极争取社区参与，通过宣传教育、开展社区培训和社区发展项目、组建社区共管组织等措施，协调周边社区发展与自然保护的关系，有效降低社区居民对廊道的干扰，实现生态保护与区域经济社会的协调和可持续发展.

**致谢** 感谢四川省第四次大熊猫调查队队员提供相关资料.

## 参考文献 [References]


1 Andren H. Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review [J]. *Oikos*, 1994, **71**: 355-366

2 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2007 [Wu JG. Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy [M]. 2nd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2007]

3 李正玲, 陈明勇, 吴兆录. 生物保护廊道研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, **28** (3): 523-528 [Li ZL, Chen MY, Wu ZL. Research advances in biological conservation corridor [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28** (3): 523-528]

4 Gilbert-norton L, Wilson R, Stevens GR, Beard KH. A Meta-Analytic Review of Corridor Effectiveness [J]. *Conserv Biol*, 2010 **24**: 660-668

5 Coffman CJ, Nichols JD, Pollock KH. Population dynamics of *Microtus pennsylvanicus* in corridor-linked patches [J]. *Oikos*, 2001, **93**: 3-21

6 Mech SG, Hallett JG. Evaluating the effectiveness of corridors: a genetic approach [J]. *Conserv Biol*, 2001, **15**: 467-474

7 Constantine NL, Campbell TA, Baughman WM, Harrington TB, Chapman BR, MillerKV. Effects of clear cutting with corridor retention on abundance, richness, and diversity of small mammals in the Coastal Plain of South Carolina, USA [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **202**: 293-300

8 国家林业局. 全国第三次大熊猫调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2006 [State Forestry Administration of China. The 3rd National Survey Report on Giant Panda in China [M]. Beijing: Science Press, 2006]

9 冉江洪, 曾宗永, 刘世昌, 王鸿加. 四川大相岭大熊猫种群及栖息地调查. 四川大学学报[J], 2006, **43** (4): 889-893 [Ran JH, Zeng ZY, Liu SC, Wang HJ. A survey of the Giant Panda population and habitat in the Daxiangling Mountains [J]. *J Sichuan Univ*, 2006, **43** (4): 889-893]

10 胡锦矗. 大熊猫的研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001 [Hu JC. Research on the Giant Panda [M]. Shanghai: Shanghai Publishing House of Science and Technology, 2001]

11 徐卫华, 欧阳志云, 蒋泽银, 郑华, 刘建国. 大相岭山系大熊猫生境评价与保护对策研究[J]. 生物多样性, 2006, **14** (3): 223-231 [Xu WH, Ouyang ZY, Jiang ZY, Zheng H, Liu JG. Assessment of giant panda habitat in the Daxiangling Mountain Range, Sichuan, China [J]. *Biodiv Sci*, 2006, **14** (3): 223-231

12 张文广, 唐中海, 齐敦武, 胡远满, 胡锦矗. 大相岭北坡大熊猫生境适宜性评价[J]. 兽类学报, 2007, **27** (2): 146-152 [Zhang WG, Tao ZH, Qi DW, Hu YM, Hu JC. Habitat assessment for giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) on the northern slope of the Daxiangling Mountains [J]. *Acta Theriol Sin*, 2007, **27** (2): 146-152]

13 Zhu LF, Zhang SN, Gu XD, Wei FW. Significant genetic boundaries and spatial dynamics of giant pandas occupying fragmented habitat across southwest China [J]. *Mol Ecol,* 2011, **20** (6): 1122-1132

14 蒋光全, 王敏. 土地岭-岷山A、B种群交流廊道建设可行性探讨[J]. 四川林勘设计, 2010 (3): 41-44 [Jiang GQ, Wang M. Ciscussion the feasibility of corridor building about population A, B in Tudiling, Minshan Mountains [J]. *Sichuan For Explor Design*, 2010 (3): 41-44]

15 陈家德, 高天雷, 张文. 岷山山系土地岭大熊猫栖息地廊道特征及影响因素分析[J]. 四川林业科技, 2011, **32** (6): 52-55 [Chen JD, Gao TL, Zhang W. Analysis of the characteristics and effective factors of the giant panda habitat corridor establishment in Tudeling Area [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2011, **32** (6): 52-55]

16 Qi DW, Hu YB, Gu XD, Yang XY, Yang G, Wei FW. Quantifying landscape linkages among giant panda subpopulations in regional scale conservation [J]. *Integr Zool*, 2012 (7): 165-174

17 李承彪. 大熊猫主食竹研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1997 [Li CB. A Study of Staple Food Bamboo for the Giant Panda [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1997]

18 Phillips SJ, Dudik M, Schapire RB. A maximum entropy approach to species distribution modeling [C]. ICML '04 Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning. New York: Association for Computing Machinery, 2004. 83

19 Jiménez-Valverde A, Lobo JM. Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence [J]. *Acta Oecol*, 2007, **31** (3): 361-369

20 Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, **190** (3-4): 231-259

21 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1995 [Wu ZY. The Vegetation of China [M]. Beijing: Science Press, 1995]

22 胡锦矗, Schaller GB, 潘文石. 卧龙的大熊猫[M]. 成都: 四川科技出版社, 1985 [Hu JC, Schaller GB, Pan WS. The Giant Panda of Wolong [M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1985]

23 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 常禹, 张娜. 景观生态学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2003 [Xiao DN, Li XZ, Gao J, Chang Y, Zhang N. Landscape Ecology [M]. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 2003]

24 Zeller KA, McGarigal K, Whiteley AR. Estimating landscape resistance to movement: a review [J]. *Landscape Ecol*, 2012, **27**: 777-797

25 欧阳志云, 刘建国, 肖寒, 谭迎春, 张和民. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价[J]. 生态学报, 2001, **21** (11): 1869-1874 [Ouyang ZY, Liu JG, Xiao H, Tan YC, Zhang HM. An assessment of giant panda habitat in Wolong Nature Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **21** (11): 1869-1874]

26 徐卫华, 罗翀, 欧阳志云, 张路. 区域自然保护区群规划——以秦岭山系为例[J]. 生态学报, 2010, **30** (6): 1648-1654 [Xu WH, Luo C,

Ouyang ZY, Zhang L. Designing regional nature reserves group: the case study of Qinling Mountain Range, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (6): 1648-1654]

27 Wang XZ, Xu WH, Ouyang ZY. Integrating population size analysis into habitat suitability assessment: implications for giant panda conservation in the Minshan Mountains, China [J]. *Ecol Res*, 2009, **24**: 1101-1109

28 陈利顶, 傅伯杰, 刘雪华. 自然保护区景观结构设计与物种保护——以卧龙自然保护区为例[J]. 自然资源学报, 2000, **15** (2): 164-169 [Chen LD, Fu BJ, Liu XH. Landscape pattern design and wildlife conservation in nature reserve: case study of Wolong Nature Reserve [J]. *J Nat Resour*, 2000, **15** (2): 164-169]

29 Noss RF. Corridors in real landscape: a reply to Simberloff and Cox [J]. *Conserv Biol*, 1987, **1** (2): 159-164

30 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, **25** (9): 2406-2412 [Zhu Q, Yu KJ, Li DH. The width of ecological corridor in landscape planning [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (9): 2406-2412]

31 吕海燕, 李政海, 李建东, 宋国宝. 廊道研究进展与主要研究方法[J]. 安徽农业科学, 2007, **35** (15): 4480-4484 [Lü HY, Li ZH, Li JD, Song GB. Research development and main method of the corridor [J]. *J Anhui Agric*, 2007, **35** (15): 4480-4484]

32 Andreassen HP, Hertzberg K, Ims RA. Space-use responses to habitat fragmentation and connectivity in the root vole microtus oeconomus [J]. *Ecology*, 1998, **79** (4): 1223-1235

33 Harrison RL. Toward a theory of inter-refuge corridor design [J]. *Conserv Biol*, 1992, **6**: 293-295

34 曾涛, 冉江洪, 刘少英, 孙治宇, 刘世昌, 曾宗永. 四川白河自然保护区大熊猫对生境的利用[J]. 应用与环境生物学报, 2003, **9** (4): 405-408 [Zeng T, Ran JH, Liu SY, Sun ZY, Liu SC, Zeng ZY. Habitat exploitation by panda in the Baihe Nature Reserve [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2003, **9** (4): 405-408]