

DOI: 10.5846/stxb202104130952

蒋爱萍, 靳甜甜, 张丽萍, 李倩雯, 朱博然, 张迪. 西南地区道路建设对植被净初级生产力的影响. 生态学报, 2022, 42(9): 3624-3632.

Jiang A P, Jin T T, Zhang L P, Li Q W, Zhu B R, Zhang D. Influence of road construction on vegetation net primary productivity in southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3624-3632.

西南地区道路建设对植被净初级生产力的影响

蒋爱萍², 靳甜甜^{1,*}, 张丽萍², 李倩雯¹, 朱博然³, 张迪¹

1 中国水利水电科学研究院, 北京 100038

2 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

3 河海大学水文水资源学院, 南京 210009

摘要: 道路建设促进区域社会经济发展的同时, 通过直接改变原有生态系统、间接增强人类活动进而改变原有生态系统的途径对周围生态系统产生影响。定量评估道路建设对植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 的影响对掌握线性工程生态环境影响, 进行社会经济发展与生态安全权衡具有一定现实意义。基于西南地区 2016 年道路和 2015 年 NPP 数据, 利用核密度 (Kernel Density, KD) 表征道路影响域和影响强度, 借助 ArcGIS 平台, 分析不同土地覆被和经济发展强度下道路建设与 NPP 的关系。结果表明: (1) 搜索半径为 0.5km 时, 道路 KD (km/km^2) 范围为 [0.0, 47.3], 其中道路 KD 为零的区域约占研究区总面积的 79.8%, 这些未受道路干扰区域大部分位于西藏、青海、四川西部、贵州和云南的西北部; 道路 KD 为 (0.0, 5.0] 的区域约占道路 KD 非零区域面积的 88.4%, 除成都、重庆、贵阳、南宁、昆明等城市外, 区域大部分地区道路密度仍处于较低水平。 (2) 从不同土地覆被下道路 KD 与 NPP 的关系来看, 中低道路干扰条件下, 林地、耕地和人工表面稳定性更强, 道路 KD 小于 4.1 时 NPP 相对稳定, 而草地、湿地和其他土地覆被在道路 KD 大于 2.1 后, NPP 出现急剧变化。随道路 KD 增大 NPP 趋于发散, 这可能是由道路密度增加后其两侧人类干扰类型多样化引起。 (3) 以县级行政区划为单位, 按单位面积道路 KD 由小到大的顺序, 将研究区分成 5 个部分: 分区 1—分区 5。在分区 1, NPP 随道路 KD 增大呈先波动升高, 相对稳定变化后降低再发散; 在分区 2—分区 5, NPP 随道路 KD 增大总体呈降低趋势, 且变异性逐渐增加, 经历了相对稳定阶段、线性变化阶段、发散阶段。根据研究结果, 道路建设需重点关注生态敏感脆弱区的植被保护, 如草地和湿地, 应尽量避免较高密度道路建设带来的生态系统退化问题, 同时应根据不同的地区制定适宜的保护方案。

关键词: 道路建设; 植被净初级生产力; 核密度; 生态系统

Influence of road construction on vegetation net primary productivity in southwest China

JIANG Aiping², JIN Tiantian^{1,*}, ZHANG Liping², LI Qianwen¹, ZHU Boran³, ZHANG Di¹

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

2 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

3 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210009, China

Abstract: While road construction should facilitate regional socio-economic development, it also imposes impact on the surrounding ecosystem by directly changing the original ecosystem and indirectly enhancing the intensity of human activities. Quantitative assessment of the road construction impact on the net primary productivity (NPP) of vegetation has a certain practical significance for grasping the ecological and environmental influence of linear engineering and weighting the socio-economic development and ecological safety. Based on the road data of 2016 and NPP data of 2015 in southwest China, this study used kernel density (KD) to represent the road-effect zone and influence intensity and analyzed the relationship between road construction and NPP under different land cover and economic development intensity with the help of ArcGIS

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502103)

收稿日期: 2021-04-13; 网络出版日期: 2022-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jtt_05@163.com

platform. The results show that: (1) when the search radius is 0.5 km, the road KD ranges from 0.0 to 47.3, and the areas where road KD is zero account for around 79.8% of the total research area. Most the undisturbed areas are located in Tibet, Qinghai, and western Sichuan, Guizhou, and northwest Yunnan. The areas where road KD ranges from 0.0 to 5.0 account for around 88.4% of the non-zero road KD areas. Except for cities such as Chengdu, Chongqing, Guiyang, Nanning, and Kunming, the road density in most regions are still at a low level. (2) In terms of the relationship between road KD and NPP under different land cover, forestlands, croplands and built-up lands are more stable under low and medium road disturbance conditions, and NPP is relatively constant when road KD is less than 4.1. However, NPP has changed sharply under the land cover types of grasslands, wetlands and others when road KD is greater than 2.1. With the increase of road KD, NPP tends to diverge, which may be caused by the diversification of different human disturbances on both sides of the road with the increase of road density. (3) Take county administrative divisions as units, the research is divided into 5 zones according to the road KD of per unit area, which gradually increases from zone 1 to zone 5. In zone 1, the NPP increases volatility with the change of road KD, and then decreases and diverges after the relatively stable change; In zone 2 to zone 5, with the increase of road KD, NPP generally shows a decreasing trend, and its variability increases gradually, and it has gone through three stages: relative stability, linear change and divergence. According to the results of this study, road construction should focus on the protection of vegetation in ecologically sensitive and vulnerable areas, such as grasslands and wetlands, and avoid the degradation of the ecosystem caused by high-density road construction as much as possible, and formulate appropriate protection schemes according to different regions.

Key Words: road construction; net primary productivity of vegetation; kernel density; ecosystem

道路建设在促进区域社会经济发展的同时,通过直接改变原有生态系统、间接增强人类活动进而改变原有生态系统的途径对周围生态系统产生影响^[1-2]。植被净初级生产力(NPP)是植被所固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分,是表征陆地生态过程的关键参数,也是陆地生态系统可持续发展评价的重要指标^[3-5]。因此,定量评估道路建设对NPP的影响对于掌握线性工程生态环境影响,进行社会经济发展与生态安全权衡具有一定现实意义。相对于直接影响,道路建设带来的间接影响更不容忽视。在人类活动向自然生态系统渗透的过程中,道路起到了血管作用,成为物质输送的最重要通道,各种人类活动也不断地被引入和叠加。道路工程在促进经济发展的同时,也会对周围生态系统结构和功能产生一定影响^[6-7]。道路网络化引起景观破碎化,使生态系统水文连通性受阻、流域径流过程受到影响等^[8-9],这些影响也是道路工程对NPP影响的潜在途径。除评估道路建设的直接影响,在一定空间范围内评估道路建设带来的其他活动对生态系统格局和过程产生的影响也有一定必要性。相对于常用的道路密度和缓冲区的计算方法,道路核密度(KD)引入搜索半径代表道路影响域,KD函数代表随距离增加道路影响衰减的模式,能更客观地反映道路建设的影响,并可反映不同道路建设的叠加效应^[10-12]。

西南地区是我国森林和水资源等自然资源最为丰富的地区,也是我国重要的生态屏障区^[13]。但是该地区地形起伏大、生态系统敏感、脆弱,日益增强的人类活动成为影响该区域生态环境的重要因素,尤其是城市化发展、重大工程建设等成为其生态安全的潜在威胁^[14-15]。本研究基于西南地区2016年道路网络、2015年NPP数据,利用KD估算方法、借助ArcGIS平台,研究西南地区道路建设对NPP的影响,以期为该地区社会经济发展与生态安全权衡提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

西南地区包括四川、云南、贵州、广西、重庆五省以及西藏和青海的部分县市。该地区深居内陆,地势西高东低,地形崎岖不平,地貌复杂多样,是我国喀斯特和冰川地貌分布最广泛的区域^[16]。由于地形地貌的限制,长期以来西南地区交通运输发展缓慢,制约了其经济发展。随着新一轮西部大开发、“一带一路”、长江经济

带及精准扶贫等政策的实施,西南地区社会经济水平得到明显提升。2011—2018 年西南地区各省(区、市)经济平均增速大幅高于全国平均增速^[17]。而在这一过程中,交通路网的改善起着重要支撑作用。目前,西南地区现已形成以铁路、公路为主的交通网络体系^[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

西南地区 NPP 数据来自于中国科学院遥感与数字地球研究所提供的 2015 年西南地区月度净初级生产力生态参数数据集,NPP 的估算由植物吸收的光合有效辐射和实际光能利用率表示^[19]。道路数据采用的是 2016 年全国电子地图中的道路网络(包括地铁、高速、国道、铁路、九级路、省道、县道、城市快速路、乡镇村道、其他道路)。

1.2.2 道路 KD 估算方法

道路 KD 估算首先需要定义分辨率,并按照确定的分辨率将矢量道路图层栅格化处理,再计算空间上任意一个栅格的 KD。KD 估算方法为:首先,定义搜索半径;其次,以此栅格为圆心以设定的搜索半径为半径画圆找出落在圆内所有道路的栅格;再次,通过核函数计算出每个道路栅格对该栅格的密度贡献值;最后,将该栅格搜索半径范围内所有道路栅格对该栅格的密度贡献值累加即为该栅格的 KD。KD 估算中常用的核函数为 Rosenblatt-Parzen 核估计^[20-21]。在 KD 估算中,搜索半径的选择对于计算结果影响较大:搜索半径越大,空间上点密度变化越光滑,生成的结果更抽象从而掩盖密度结构;搜索半径越小,密度变化越突兀不平,能展示更多的细节^[21];在具体的应用中,应根据不同需求,选取合适的搜索半径。本研究根据线性工程特点和以往道路影响域的研究^[22-25],以 0.5km 为搜索半径来分析西南地区路网 KD 特征,基于此分析 NPP 与道路 KD 的关系。

2 结果与分析

2.1 西南地区道路 KD 分布

西南地区大部分区域道路 KD 为零,非零区域的道路 KD 也较低(图 1)。道路 KD 为零的区域约占研究

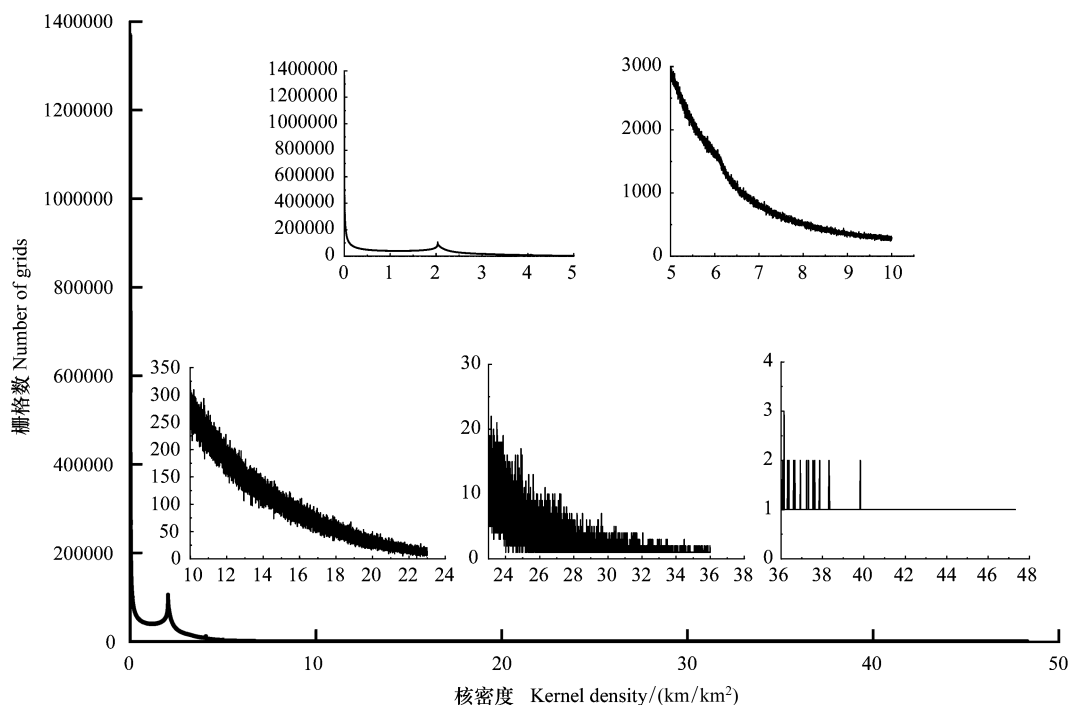


图 1 2016 年西南地区道路核密度(KD)频率分布图

Fig.1 Frequency distribution map of road Kernel density (KD) in southwest China in 2016

区总面积的 79.8%,大部分位于西藏、青海、四川西部、贵州和云南的西北部,这些地区处于青藏高原或者青藏高原的东部和东南边缘,人类活动强度较小;研究区道路 KD(km/km^2)最大值为 47.3(图 2),出现在成都、德阳一带。非零区域中,道路 KD 在(0.0,5.0]范围内的区域约占研究区总面积的 17.8%,占道路 KD 非零区域的 88.4%;道路 KD 在(5.0,36.0]范围内的区域面积随道路 KD 的增加,栅格数(面积)明显减少;道路 KD 大于 36.0 的面积已极小(图 1)。

西南地区道路 KD 空间分布不均,呈现出东高西低的特征(图 2)。道路 KD 较高的地区主要分布在交通路网复杂的东部地区,包括四川、重庆、贵州、云南和广西等地,这些地区也是道路 KD“热点”(道路 KD 较高)出现最多的地区,而西部地区如西藏和青海部分地区道路 KD 较低。图 2 中成都市、德阳市和绵阳市中心道路 KD 分别为 25.3、16.4、16.3,是西南地区路网较为密集的地区;图 2 中遵义市、保山市和香格里拉市代表西南地区道路密度中等的城市,其市中心道路 KD 分别为 13.1、12.5、11.1;图 2 中那曲市、扶冲村、南木村中心道路 KD 分别为 7.2、3.5 和 1.9,代表偏远城市、村庄和偏远小村庄的道路密集程度。

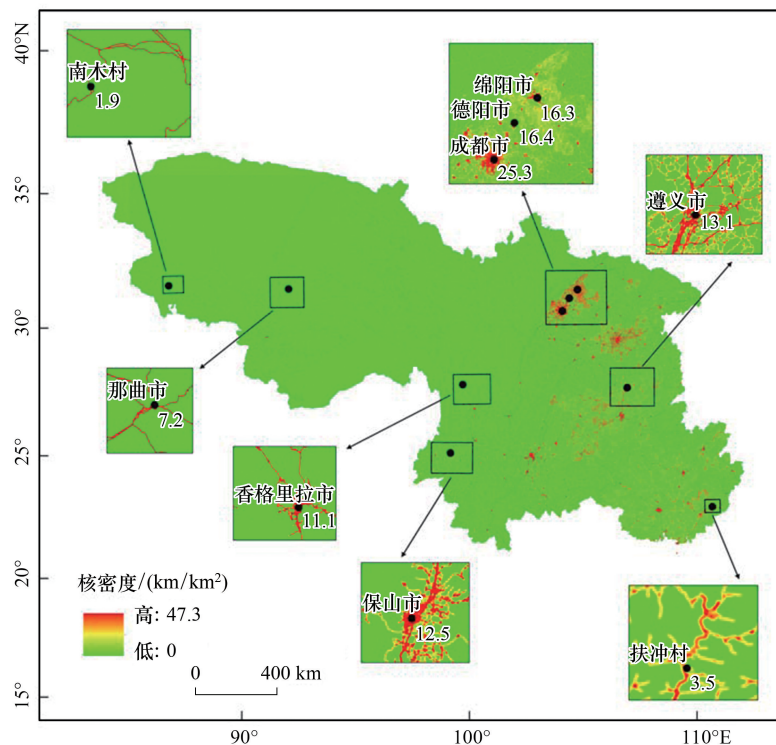


图 2 2016 年西南地区道路 KD 分布图(搜索半径 0.5km,分辨率 50m)

Fig.2 Distribution map of road KD in southwest China in 2016 (Search radius is 0.5km, resolution is 50m)

2.2 不同土地覆被下道路 KD 与 NPP 的关系分析

道路 KD 非零区域不同土地覆被类型面积百分比为:林地(43.7%)>耕地(37.1%)>草地(12.1%)>人工表面(4.6%)>湿地(2.1%)>其他(0.4%)。随着道路 KD 的增大,林地、草地、耕地等受人类干扰较低的土地覆被面积百分比逐渐降低,而人工表面面积百分比比例迅速升高,特别是当道路 KD 大于 21.0 后,土地覆被基本为人工表面(图 3 和图 4)。

不同土地覆被下,道路 KD 和 NPP 之间呈现不同关系模式(图 5)。随着道路 KD 的升高,林地、耕地和人工表面经历了相对稳定阶段、线性变化阶段、发散阶段;草地、湿地和其他土地覆被(包括裸岩、裸土、戈壁、沙漠、苔藓/地衣等)经历了相对稳定阶段、升高稳定阶段、发散阶段;随着道路 KD 的逐渐增大,NPP 变幅逐渐增加,系统呈现较大不稳定性。

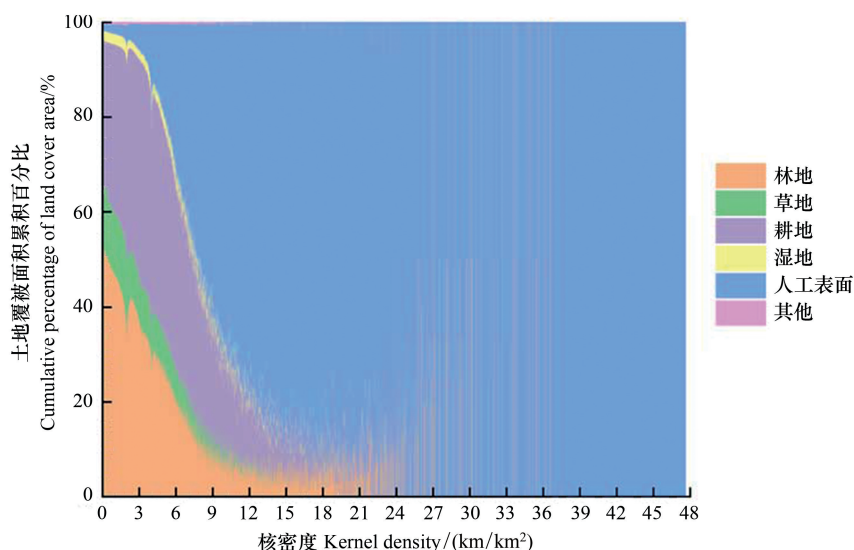


图3 西南地区土地覆被面积累积百分比随道路 KD 的变化

Fig.3 The cumulative percentage of land cover area varied with road KD in southwest China

2.3 不同县域分区道路 KD 与 NPP 的关系分析

西南地区地形、交通、经济、人口空间异质性较大,地形平坦的地区往往交通便利、经济发展程度高、人口密度大。道路密度间接反映了一个地区社会经济发展对自然生态系统的干扰程度。本文利用西南地区县级行政区划和道路 KD,计算县级行政区道路 KD 平均值,并在 ArcGIS 平台下利用聚类分析将研究区县级行政区根据道路 KD 平均值分成 5 个分区,分区 1—分区 5 的道路 KD 平均值递增,各分区的道路 KD 范围如图 6 所示。

分区 1 包括西藏、青海南部、四川西部、云南西北部,位于青藏高原及其东部边缘,土地覆被类型以草地为主(图 7)。分区 1 中道路 KD 与 NPP 的关系(图 8)

与 2.2 中土地覆被类型为草地时道路 KD 与 NPP 的关系相似:相对稳定阶段后,随道路 KD 增大 NPP 呈波动上升趋势,当道路 KD 超过 3 条道路交叉的道路 KD 最大值时,随道路 KD 增大 NPP 不断降低。在该分区,相对稳定阶段后中度干扰情况下 NPP 反而增加,但随道路 KD 的进一步增大,NPP 变幅增加的同时其值迅速降低。分区 2 主要包括云南中西部地区、东部的文山壮族苗族自治州,四川的雅安市、宜宾市、乐山市、达州市和广元等,土地覆被以林地和耕地为主(图 7)。在分区 2,道路 KD 较低时,随道路 KD 增大 NPP 呈略微下降趋势,之后经历小幅增加后迅速近线性降低,之后发散。分区 3 和分区 4 包括广西、贵州大部分地区,重庆、四川和云南东部等地区。这两个分区随道路 KD 增大 NPP 变化呈相似规律,相对稳定阶段后,NPP 线性降低,且变幅增加。分区 5 主要包括成都市、德阳市及贵州中部少部分地区,是研究区道路最为密集的区域。随道路 KD 增大 NPP 变化规律与分区 3 和分区 4 相近,但相对稳定阶段 NPP 明显低于分区 3 和分区 4。

3 讨论

3.1 不同土地覆被下道路对 NPP 的影响分析

不同土地覆被类型下,道路 KD 与 NPP 的关系呈不同模式,但也具有一定的共同特征。首先,在道路 KD

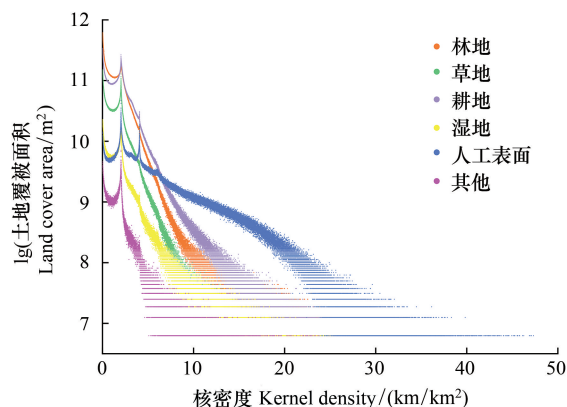


图4 西南地区土地覆被面积随道路 KD 的变化

Fig.4 land cover area varied with road KD in southwest China

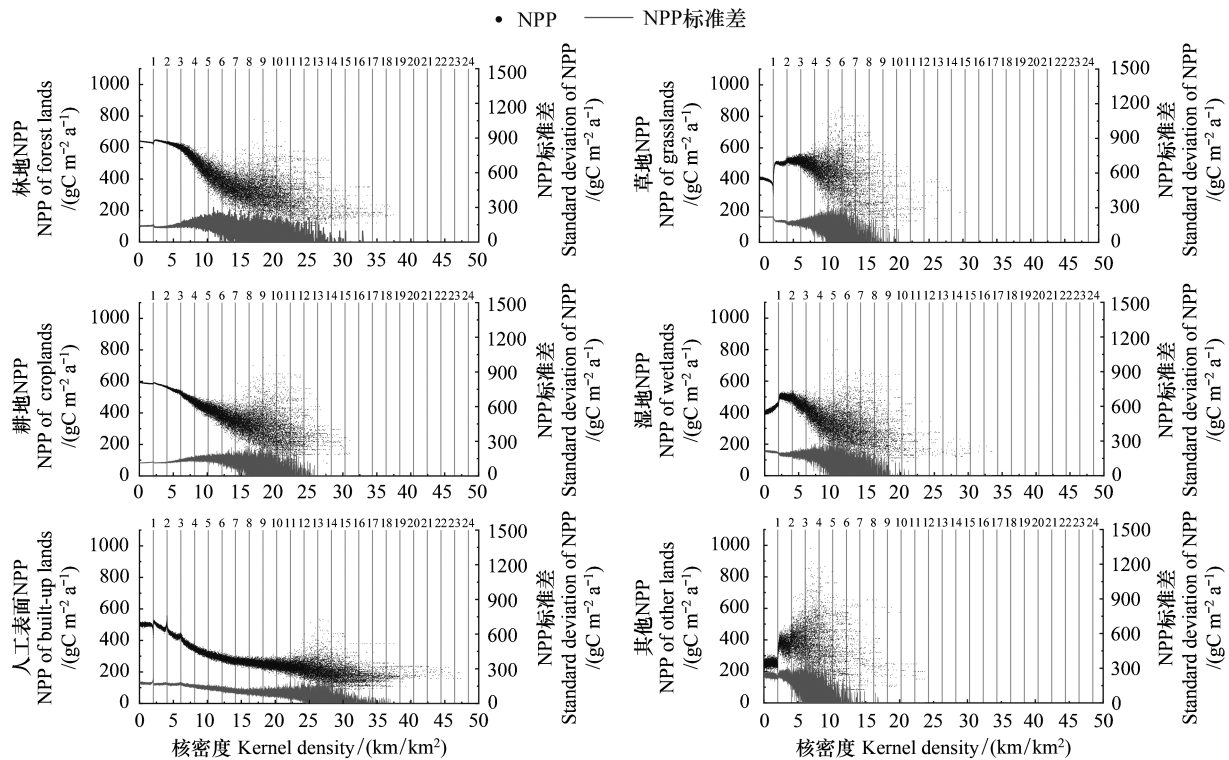


图 5 不同土地覆被下 NPP 随道路 KD 的变化

Fig.5 Changes of NPP with road KD under different land cover

NPP: 植被净初级生产力 Net primary productivity; 图中竖线条表示 n 条道路交叉核密度最大值 ($n=1, 2, \dots, 24$)

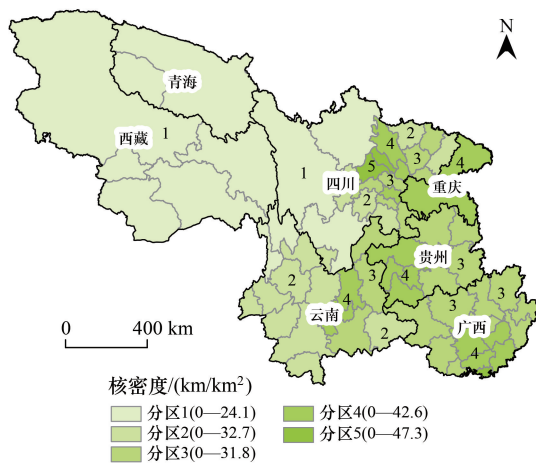


图 6 西南地区 2016 年道路 KD 分区

Fig.6 Road KD zoning map of southwest China in 2016

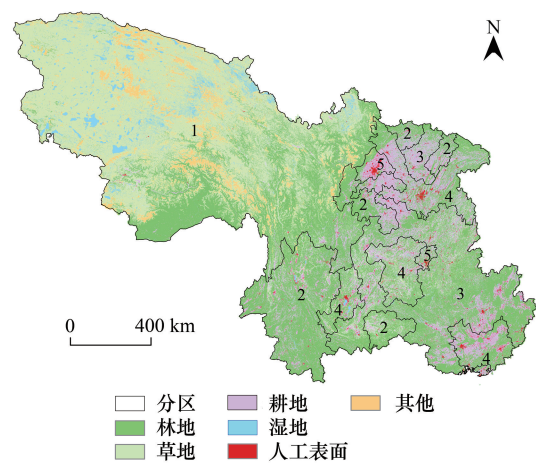


图 7 西南地区 2016 年土地覆被分区

Fig.7 Land cover zoning map of southwest China in 2016

较低区域,不同土地覆被均经历了相对稳定阶段,而这一阶段一般以一条或两条道路交叉道路 KD 最大值为分界点。NPP 是生态系统生产力的重要指标,可表征生态系统活力和健康^[26—27],而干扰环境下 NPP 的变化则反映了生态系统在干扰胁迫下的抵抗力和恢复力,是生态系统稳定性的重要体现^[28—29]。道路 KD 较低时,不同土地覆被下 NPP 均出现相对稳定阶段,说明各类土地覆被下生态系统均具有一定稳定性。林地、耕地和人工表面稳定性更强,可在道路 KD 小于 4.1 时保持 NPP 的相对稳定;而草地、湿地和其他土地覆被在道路

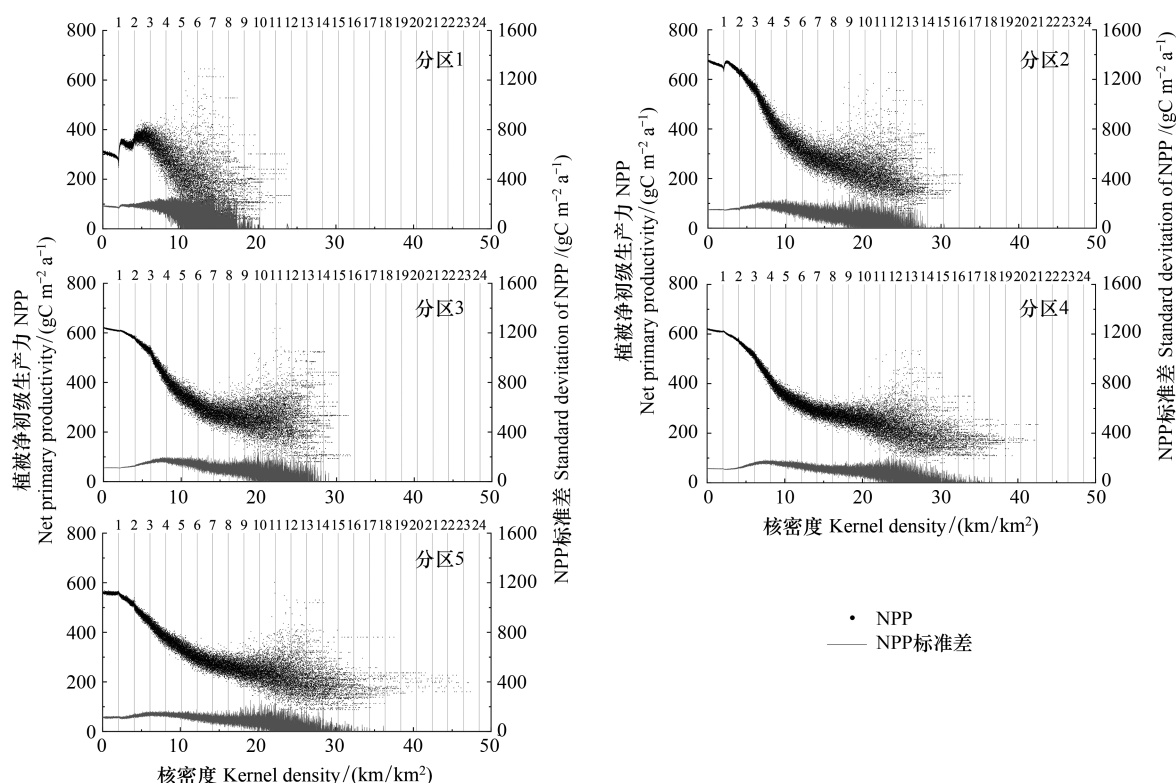


图8 不同道路 KD 分区下 NPP 变化

Fig.8 Changes of NPP under different road KD zones

KD 大于 2.1 后, NPP 出现急剧变化。从道路 KD 与 NPP 关系来看, 面对道路干扰, 林地、耕地和人工表面相比于草地、湿地和其他土地覆被具有更强稳定性。其次, 在道路 KD 较高区域 NPP 趋于发散, 可能由道路建设之后两侧人类干扰类型多样化引起。如道路两侧行道树的种植、绿地公园的修建、有坡度地区道路修建后水流的阻断使道路靠近上坡位一侧水分增加等都会显著弥补道路修建的直接和间接干扰带来的 NPP 的降低, 而道路建设后永久性建筑物的扩张、裸露地面的增加等都会使 NPP 明显降低^[30-31]。此外, 道路 KD 越大, 景观破碎化越严重, 平均斑块面积越小, 单个栅格内包含不同土地覆被类型等, 也会增加相同道路 KD 下 NPP 的异质性^[32]。

相对稳定阶段后, 不同土地覆被间道路 KD 与 NPP 之间关系差异最大, 随道路 KD 增加: 林地、耕地和人工表面三种土地覆被类型 NPP 近线性降低, 草地、湿地和其他土地覆被类型 NPP 有突然升高的过程, 且较平稳。这可能与草地、湿地和其他土地覆被类型主要分布在西部地区, 而这些地区在有道路建设的地方一般水源条件比较好有关。此外, 居住在附近的人类对植被的管理等都会促进植被 NPP 的升高^[33]。

在六种土地覆被类型中, 人工表面 NPP 与道路 KD 之间关系规律性较强, 具体表现为: 随道路 KD 增大, NPP 从相对稳定阶段过渡到线性降低阶段, 且 NPP 的标准差在六种土地覆被中最小, 直到道路 KD > 24.0 之后, NPP 与道路 KD 之间关系才呈现明显发散趋势。耕地和林地 NPP 与道路 KD 之间关系规律性仅次于人工表面; 其他土地覆被 NPP 与道路 KD 之间关系规律性最弱(图 5)。其他土地覆被包含多种类别, 未受干扰状态下其 NPP 差异较大, 而受干扰之后稳定性也各不相同, 因此呈现出较大变异。

3.2 西南地区道路建设对 NPP 影响的区域特征

在不同分区下, NPP 随道路 KD 的增加呈现不同特征。除分区 1 外, 分区 2—分区 5 中 NPP 随道路 KD 增大均经历了相对稳定阶段、线性变化阶段、发散阶段, 且 NPP 均呈现相对稳定段 > 线性变化段 > 发散段的规律, 说明在这些区域, 道路工程修建带来的直接和间接影响显著降低了周围土地覆被的 NPP。在分区 1, NPP 随

道路 KD 增大呈先波动升高,相对稳定变化后降低再发散,其相对稳定阶段的道路 KD 范围较其他分区均要小,且随道路 KD 增大 NPP 降低的速率比其他分区大(图 8)。分区 1 位于青藏高原及其东部边缘,土地覆被以草地为主,该区域道路 KD 与 NPP 的关系和土地覆被为草地时二者关系相一致。高兴川等^[34]研究表明,青藏高原地区交通网络的连接率从 1976 年以来从 1.8 逐渐上升到 2016 年的 2.1,这反映了该地区交通网络的持续拓展。道路 KD 为(0.0,5.0]时,随道路 KD 增大,该地区 NPP 波动增加,说明适度干扰下生态系统 NPP 较稳定,中度干扰类型有利于 NPP 的升高,出现这种情况的原因可能有:首先,道路密集的区域往往是生态环境条件较好的区域;其次,道路建设后行道树的栽种、道路密集区水资源的引入可改善周围植被状况^[35]。此外,分区 1 生态系统比较脆弱,当道路 KD 进一步增大,一旦超过生态承受范围,会导致 NPP 的急剧减少。由图 8 可知,分区 2—分区 4 道路建设对 NPP 的影响大致相同,未受干扰区域 NPP 值也相近,这主要是因为这些地区分布在云南大部分区域、四川东部、重庆、贵州和广西地区,这些地区气候均属于亚热带季风型,水热条件相似。此外,这些地区道路建设水平相近,尤其是分区 2 和分区 3,其道路 KD 范围相近,分别为 0—32.7、0—31.8。

4 结论

本文利用 KD 估算方法、借助 ArcGIS 平台研究了西南地区不同土地覆被、道路 KD 分区下 NPP 随道路 KD 的变化情况,得到如下结论:

(1)在搜索半径 0.5km 下,西南地区道路 KD 范围为[0.0,47.3],其中道路 KD 为零区域约占研究区总面积的 79.8%,主要分布在西藏、青海、四川西部、贵州和云南的西北部;道路 KD 为(0.0,5.0]的区域占道路 KD 非零区域的 88.4%;道路 KD“热点”主要分布在东部地区,除成都、重庆、贵阳、南宁、昆明等城市外,区域大部分地区道路密度仍处于较低水平。

(2)在中低道路干扰条件下,林地、耕地和人工表面稳定性更强,可在道路 KD 小于 4.1 时保持 NPP 的相对稳定,而草地、湿地和其他土地覆被在道路 KD 大于 2.1 后,NPP 出现急剧变化;高强度道路干扰下 NPP 趋于发散,可能由道路建设之后两侧人类干扰类型多样化引起。

(3)除单位面积道路 KD 较小的分区 1 外,其他分区(分区 2—分区 5)NPP 随道路 KD 的增加总体呈降低趋势,且变异性逐渐增加,经历了相对稳定阶段、线性变化阶段、发散阶段。

综上,不同的区域植被 NPP 随道路 KD 的增大呈不同变化模式,这主要是因为不同地区道路建设对植被的影响受自然因素和人为因素的共同作用,如自然背景、土地覆被组成和人类活动强度等。本研究结果表明:在六种土地覆被类型中,草地、湿地等土地覆被类型对道路建设较为敏感,在生态敏感性和脆弱性较高的西部地区,道路建设带来的影响与东部地区截然不同。因此,在进行道路建设时,应根据不同的地区制定适宜的保护方案。

参考文献(References):

- [1] 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.山地学报,2003,21(5):559-567.
- [2] Saraswati S, Bhusal Y, Trant A J, Strack M. Roads impact tree and shrub productivity in adjacent boreal peatlands. Forests, 2020, 11(5):594.
- [3] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975.
- [4] 赵俊芳, 延晓冬, 朱玉洁. 陆地植被净初级生产力研究进展. 中国沙漠, 2007, 27(5):780-786.
- [5] Sun J, Du W P. Effects of precipitation and temperature on net primary productivity and precipitation use efficiency across China's grasslands. GIScience & Remote Sensing, 2017, 54(6):881-897.
- [6] 梅志雄, 徐颂军, 欧阳军. 珠三角公路通达性演化及其对城市潜力的影响. 地理科学, 2013, 33(5):513-520.
- [7] 李月辉, 胡远满, 李秀珍, 肖笃宁. 道路生态研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(3):447-452.
- [8] 沈洁. 上海浦东新区城市化进程对水系结构、连通性及其调蓄能力的影响研究[D]. 上海:华东师范大学, 2015.
- [9] Wemple B C, Browning T, Ziegler A D, Celi J, Chun K P, Jaramillo F, Leite N K, Ramchunder S J, Negishi J N, Palomeque X, Sawyer D. Ecohydrological disturbances associated with roads: current knowledge, research needs, and management concerns with reference to the tropics.

- Ecohydrology, 2018, 11(3): e1881.
- [10] 韩宇瑶, 焦利民, 许刚. 武汉市道路结构与商业集聚空间关联分析. 地理科学进展, 2017, 36(11): 1349-1358.
- [11] 唐炉亮, 阚子涵, 刘汇慧, 孙飞, 吴华意. 网络空间中线要素的核密度估计方法. 测绘学报, 2017, 46(1): 107-113.
- [12] 邹丹, 毛政元, 李继红, 刘小伶. 核密度估计的道路匹配方法探讨. 测绘科学, 2015, 40(7): 104-108.
- [13] 刘国华. 西南生态安全格局形成机制及演变机理. 生态学报, 2016, 36(22): 7088-7091.
- [14] Peng L, Deng W, Zhang H, Sun J, Xiong J N. Focus on economy or ecology? A three-dimensional trade-off based on ecological carrying capacity in southwest China. Natural Resource Modeling, 2019, 32(2): e12201.
- [15] Wu X, Liu S L, Cheng F Y, Hou X Y, Zhang Y Q, Dong S K, Liu G H. A regional strategy for ecological sustainability: a case study in Southwest China. Science of the Total Environment, 2018, 616-617: 1224-1234.
- [16] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 赵旦, 吴炳方. 近 15 年中国西南地区植被覆盖度动态变化. 国土资源遥感, 2017, 29(3): 128-136.
- [17] 袁伟彦, 杨柳. 2011 年以来中国西南地区与东北地区经济增速分化研究. 经济研究参考, 2019, (13): 98-108.
- [18] 唐正霞. 交通网络、城镇化对西南地区县域经济增长的空间效应研究[D]. 北京: 中央财经大学, 2019.
- [19] 李贵才. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2004.
- [20] 蔡雪娇, 吴志峰, 程炯. 基于核密度估算的路网格局与景观破碎化分析. 生态学杂志, 2012, 31(1): 158-164.
- [21] 刘锐, 胡伟平, 王红亮, 吴驰, 何劲. 基于核密度估计的广佛都市区路网演变分析. 地理科学, 2011, 31(1): 81-86.
- [22] 丁宏, 金永焕, 崔建国, 赵林森, 朴正吉. 道路的生态学影响域范围研究进展. 浙江林学院学报, 2008, 25(6): 810-816.
- [23] Forman R T T, Deblinger R D. The ecological road-effect zone of a Massachusetts (U.S.A.) suburban highway. Conservation Biology, 2000, 14(1): 36-46.
- [24] Tegebu F N, Seid E H. Quantifying the road influence zone on socio-economic developments in rural Tigray, Ethiopia. African Development Review, 2017, 29(4): 601-614.
- [25] Deljouei A, Sadeghi S M M, Abdi E, Bernhardt-Römermann M, Pascoe E L, Marcantonio M. The impact of road disturbance on vegetation and soil properties in a beech stand, Hyrcanian forest. European Journal of Forest Research, 2018, 137(6): 759-770.
- [26] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 陆兆华, 邓红兵, 马克明, 张萍. 生态系统健康评价方法初探. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486-490.
- [27] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [28] 高东, 何霞红. 生物多样性与生态系统稳定性研究进展. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2507-2513.
- [29] 田义超, 黄远林, 张强, 陶进, 张亚丽, 黄鹄, 周国清. 北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱动因素. 生态学报, 2019, 39(21): 8156-8171.
- [30] Awal M A, Ohta T, Matsumoto K, Toba T, Daikoku K, Hattori S, Hiyama T, Park H. Comparing the carbon sequestration capacity of temperate deciduous forests between urban and rural landscapes in central Japan. Urban Forestry and Urban Greening, 2010, 9(3): 261-270.
- [31] Zhang C, Tian H, Pan S, Lockaby G, Chappellka A. Multi-factor controls on terrestrial carbon dynamics in urbanized areas. Biogeosciences, 2014, 11(24): 7107-7124.
- [32] Lin Y Y, Hu X S, Lin M S, Qiu R Z, Lin J G, Li B Y. Is forest landscape pattern more affected in road overlap zone: evidence from an upstream area of the Minjiang river of Fujian province in the subtropical region of China. Applied Ecology & Environmental Research, 2020, 18(2): 3693-3711.
- [33] 刘世梁, 孙永秀, 赵海迪, 刘轶轩, 李明琦. 基于多源数据的三江源区生态工程建设前后草地动态变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(10): 3865-3877.
- [34] 高兴川, 曹小曙, 李涛, 吕敏娟. 1976-2016 年青藏高原地区通达性空间格局演变. 地理学报, 2019, 74(6): 1190-1204.
- [35] Zhang Y, Hu Q W, Zou F L. Spatio-temporal changes of vegetation net primary productivity and its driving factors on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2001 to 2017. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1566.