

道路侵蚀研究的进展与展望

徐倩¹, 焦菊英^{1,2}, 严晰芹², 陈玉兰², 宗小天¹, 林红^{1,3}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.西藏自治区山南市错那县自然资源局, 西藏 山南 856000)

摘要: [目的] 分析目前道路侵蚀研究中所存在的问题及未来亟需关注的研究方向, 为防治流域土壤侵蚀和保障流域生态环境安全与高质量发展提供重要依据。[方法] 通过查阅文献, 从道路侵蚀的界定、道路侵蚀的特征及影响因素, 道路侵蚀研究方法等方面进行总结和分析。[结果] 目前关于道路侵蚀研究存在的主要问题表现在: ①研究方法尚不成熟, 模拟降雨/冲刷试验法应用较广, 实地监测法和模型模拟法应用较少; ②研究内容多局限于道路原位侵蚀效应, 而鲜少涉及道路异位侵蚀效应; ③道路侵蚀防治研究大都围绕硬化道路进行, 土质道路相关研究薄弱。[结论] 未来关于道路侵蚀的研究应结合道路侵蚀特点及其影响因素, 运用连通性的概念, 探明道路存在对流域及整个流域中的径流泥沙输移的“开关”作用, 揭示道路对流域内径流及泥沙的输移机制的影响, 并因地制宜地提出硬化道路的维护管理措施和土质道路的侵蚀防治措施。

关键词: 道路侵蚀; 连通性; 径流泥沙输移机制; 研究进展

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2021)04-0357-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 徐倩, 焦菊英, 严晰芹, 等. 道路侵蚀研究的进展与展望[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 357-367. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.046; Xu Qian, Jiao Juying, Yan Xiqin, et al. Progress and prospect of research on road erosion [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 357-367.

Progress and Prospect of Research on Road Erosion

Xu Qian¹, Jiao Juying^{1,2}, Yan Xiqin², Chen Yulan², Zong Xiaotian¹, Lin Hong^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Natural Resources Department of Cuona County in Shannan City of Tibetan Autonomous Region, Shannan, Tibet 856000, China)

Abstract: [Objective] The existing issues in road erosion research and the research directions that need to be paid attention in the future were analyzed in order to provide important basis for soil erosion prevention and control, ecological environment safety and high-quality development of the watershed. [Methods] Through literature review, the definition of road erosion, the characteristics and influencing factors of road erosion were summarized and analyzed. [Results] The main problems existing in the study of road erosion are as follows: ① The research methods of road erosion were still immature. Simulated rainfall/scour test method were widely used, while field monitoring and model simulations were rarely used. ② Most of research contents were limited to the in-site erosion effect of road, and few involve the off-site erosion effect of road. ③ Most studies on road erosion control were focused on hardened roads, and only a few studies were focused on unhardened roads. [Conclusion] Future road erosion study should combine the characteristics of road

收稿日期: 2021-04-24

修回日期: 2021-05-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵沟壑区小流域道路侵蚀与水文连通性的耦合作用机制”(42077078), “黄土丘陵沟壑区流域泥沙连通性对降雨与人类活动的响应机制”(41771319)

第一作者: 徐倩(1995—), 女(汉族), 陕西省汉中市人, 博士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀。Email: xuqian1995@nwfufu.edu.cn。

通讯作者: 焦菊英(1965—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价。Email: jyjiao@ms.iswc.ac.cn。

erosion and its influencing factors, use the concept of connectivity to explore the “switch” effect of road on the transportation of runoff and sediment in the road area and the whole watershed, so as to reveal the influence of road on the mechanism of runoff and sediment transportation in the whole watershed. In future, the maintenance and management measures of hardened road and erosion control measures of soil road should be proposed according to local conditions.

Keywords: road erosion; connectivity; runoff and sediment transport mechanism; research progress

土壤侵蚀是全球范围内亟待解决的环境问题^[1]。自上个世纪以来,针对全球范围内的土壤侵蚀问题,各个国家实施一系列水土保持工程措施、农业措施和生态措施,有效地改善了由于人类频繁活动而引发的土壤侵蚀灾害频发态势^[2]。大量研究^[3-6]表明,在全球总体生态环境得到优化的同时,由于道路产生的剧烈侵蚀为生产生活带来的危害也日益凸显。道路是区域社会和经济高速发展的重要枢纽^[7]。近年来为满足人们日益增多的农业生产、资源开发和经济活动的需求,道路数量始终呈现持续增加趋势,人们生产生活在得到满足和提升的同时,也伴随着土地退化、环境破坏、噪声污染等一系列问题^[8-9]。道路侵蚀在流域内普遍存在,且侵蚀效应显著。尤其是在乡村和偏远地区,占比很大的土质低等级道路所引起的土壤侵蚀问题也不容小觑^[10]。例如,次暴雨条件下黄土高原地区,沟坡道路的侵蚀模数达到 $450 \sim 640 \text{ t/hm}^2$ ^[11-12],且流域内 85% 的土质道路均有侵蚀发生^[13];美国维京群岛不同使用程度的未硬化路面产沙率为 $57 \sim 580 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[14]。目前,道路侵蚀的治理已成为防治流域水土流失的重要内容。为了有效治理流域水土流失、土地退化、水源污染等环境问题,目前,全世界的学者们对道路侵蚀进行了大量研究。本文通过总结国内外道路侵蚀的研究进展,从道路侵蚀的界定、道路侵蚀的特征、影响道路侵蚀发生的因素以及现阶段道路侵蚀的研究方法等方面进行了梳理,以此提出目前道路侵蚀研究中所存在的问题及未来亟需关注的研究方向,以期对未来道路侵蚀防治、流域水土流失治理及流域生态环境保护提供参考依据。

1 道路侵蚀的界定

道路作为一种线状或网状的土地利用方式,其土壤侵蚀过程和方式具有特殊性,由于复杂的侵蚀过程及众多的影响因素,使得道路侵蚀多呈现为一种复合的侵蚀方式^[15-16]。此外,由于道路的存在,也会改变流域内部径流泥沙输移模式。早在上个世纪就有研究指出,道路侵蚀不仅仅是道路路面侵蚀,还包括

道路边坡、路堑和路基侵蚀^[17]。Fu Baihua^[18]认为道路侵蚀是指发生在道路不同部位(路面、路堑、道路配套沟渠及边坡)表面的土壤被剥离、输移(指径流携带泥沙运移至河道网络的过程)和沉积的过程。张科利^[16]认为道路侵蚀是指流域中道路范围内所产生的多种侵蚀过程以及由于道路的存在改变流域径流泥沙输移方式而引起的流域侵蚀变化量。实质上,道路侵蚀不仅要考虑道路路域内(路面、道路边坡、路基、截排水沟)所产生的土壤侵蚀,还要确定流域路网作为一个系统的存在对流域的侵蚀效应,包括路网的扩展对流域径流与泥沙连通性的促进或抑制效应。换言之,道路侵蚀不仅包括道路路域内原位侵蚀,也要包括道路侵蚀的异位效应所引起的路域外部的土壤侵蚀。综上所述,本研究将道路侵蚀定义为单个道路或多个道路组成的道路网络不同部位的侵蚀过程,以及因其存在而引起发生在路域外的土壤侵蚀过程。

2 道路侵蚀的特征

2.1 道路侵蚀强度

道路由于其特殊的理化性质,道路侵蚀普遍存在且强度远远高于其他土地利用类型,产流产沙模式也异于其他土地利用方式,极易产生侵蚀危害(表 1—2),流域面积占比较小的道路所产生的侵蚀效应较显著。非硬化道路经人类长期践踏和农用车具碾压后,路面容重较大,入渗率较小,且鲜有道路防护措施,降雨后道路产流快,其路面漫流极易汇聚,形成股流进而对路面、路堤产生冲刷^[19]。在强降雨条件下,路面易被冲断或形成陷穴,阻碍交通,路堑和路堤处于滑坡与崩塌的高风险之中。而硬化道路由于其特殊的入渗性能,其路面成为良好的径流泥沙输移“中介”,导致大量径流泥沙汇聚至路域附近的坡面,对路堤边坡造成严重的侵蚀危害^[20]。如,在次降雨条件下,黄土高原地区生产道路产沙强度为 $5 \sim 135 \text{ t/hm}^2$ ^[21];西班牙 Pyrenees 山脉森林中仅供人类步行通过的小径侵蚀速率高达 $151.3 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[22]。

表1 不同区域的不同类型道路年侵蚀强度

道路类型	研究对象	年均侵蚀强度/ ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	地点	研究方法	数据来源
山坡小径	路面	540.00	美国加州	断面法	Robert ^[23]
		632.00	美国爱达荷州	断面法	Johnson ^[24]
		2 090.00	美国俄亥俄州	侵蚀针法	Dorothy ^[25]
		170.00	西班牙中部	侵蚀针法	Bodoquel ^[26]
		306.30	西班牙伊比利亚半岛	RUSLE 模型估算	LopezVicente ^[27]
		6.10	西班牙伊比利亚半岛	RMMF 模型估算	LopezVicente ^[28]
		20.50	美国弗吉尼亚州	WEPP 模型估算	Kathryn ^[29]
		81.00	美国维尔京群岛	径流泥沙收集法	RamosScharron ^[30]
		151.30	西班牙伊比利亚半岛	侵蚀针法	Bodoque ^[26]
		138.92	西班牙伊比利亚半岛	断面法	Salesa ^[31]
生产道路	暂时停用路面	146.60			
	高强度使用路面	1 111.10			
	中度使用路面	93.30	美国华盛顿州	侵蚀针法	Leslie ^[32]
	轻度使用路面	8.40			
	铺设路面	4.40			
	土质路面	272.00~275.00	马来西亚半岛	断面法	Sidle ^[33]
	土质路面	34.00~287.00	美国弗吉尼亚州	径流泥沙收集法	Kristopher ^[34]
交通道路	砾石路面	10.00~16.00	美国弗吉尼亚州	径流泥沙收集法	
	土质路面	5.70~580.00	美国维尔京群岛	径流泥沙收集法	RamosSchrrón ^[14]
	低交通路面	0.30~0.92	巴西北部	径流泥沙收集法	Teresa Raquel Lima Farias ^[35]
废弃道路	路面	12.00	美国维尔京群岛	径流泥沙收集法	RamosScharrón ^[14]
	路面	1.13	美国华盛顿州	侵蚀针法	Leslie ^[32]
公路	路堑	6.98~40.97	西班牙哈恩省	径流小区监测	De Oña ^[36]
	路堤	3.51~44.89	西班牙哈恩省	径流小区监测	
	路堑	55.50~406.00	摩洛哥东部和北部	USLE 模型估算	Chehlafi ^[37]
铁路	路堑	220.00	西班牙帕伦西亚省	侵蚀针法	Joaquín Navarro ^[8]

表2 不同区域的不同类型道路单次降雨事件下侵蚀强度

道路类型	次侵蚀强度/($t \cdot hm^2$)	研究对象	地点	研究方法	数据来源
公路	119.91	路堑边坡	青藏高原	模拟降雨试验	徐宪利 ^[38]
废弃道路	0.84	路面	美国中西部干旱亚热带地区	径流泥沙收集法	Ramos-Scharrón ^[39]
生产道路	0~30	路面	美国科罗拉多州	径流泥沙收集法	SosaPérez ^[40]
生产道路	471.78~804.77	路面	陕西子洲	断面法	Zhang ^[41]
生产道路	283.91	路面	山东潍坊	断面法	从辰宇 ^[42]

2.2 道路不同部位侵蚀特征

建设道路改变了原自然坡面形态,形成了路面、路堑边坡、路堤边坡、路基、排水设施等不同的侵蚀产沙部位,而每个部位下垫面性质差异较大,且侵蚀的驱动力也存在差别,这导致道路不同部位侵蚀方式差异较悬殊^[43]。道路路面的侵蚀形式主要是沟蚀、陷穴;道路边坡侵蚀形式主要以滑坡、崩塌、沟蚀为主;路基部位常发生塌陷、掏蚀,排水沟的侵蚀大都为沟蚀^[44-45]。除侵蚀形式不同外,道路不同部位侵蚀营力也存在一定差异。道路路面和排水沟侵蚀的发生主

要是由于降雨引起的,即多为水力侵蚀。而道路边坡和路基的侵蚀多在水力与重力的共同作用下发生,即为复合侵蚀^[41,46]。道路不同部位侵蚀形式和侵蚀营力不同,不同部位的产流产沙效应也会互相作用。道路的存在改变了原始自然坡面的水文过程,具体表现为路面将拦截的径流汇入道路排水沟或进一步输移到主沟道,为排水沟、路基和路堤边坡形成利于土壤侵蚀发育的环境^[47-48]。路面对降雨响应速度快,在很低的降雨量下也能产生大量地表径流,而排水沟作为径流泥沙输移路径,在一定程度上减缓了路面集中流

对路面的侵蚀作用^[49]。然而在一些条件下,道路网络和水文网络间的连通性较差,路堤边坡侵蚀沟是径流的主要消散途径。路堤边坡侵蚀的径流来源主要是降雨和路面汇水,极易形成坡面侵蚀沟,增加路堤边坡的侵蚀产沙量^[6,50]。在自然降雨条件下,降雨过程和路面汇水过程多同时发生,路面汇水一方面来自降雨,一方面由路堑边坡输送^[6,51],针对具有结构松散的路堑边坡路段,即使在很小的降雨条件下路堑边坡也会向路面提供径流泥沙,这会造成了路面径流过大,加剧了路面侵蚀风险。热带林区小流域的分析表明,道路土壤侵蚀的 60% 来自路面,40% 来自填挖坡。由于路面将路堑和路堤边坡连接成一个整体,因而路面对其产流和汇流的调控能力直接关系到整个道路系统的侵蚀发展过程^[33]。

2.3 道路侵蚀对流域侵蚀产沙的影响

在流域尺度上,道路网络的存在一定程度上改变了流域内部径流泥沙输移模式,还会影响流域水文连通性和泥沙连通性,导致沟道、河流和水库的泥沙淤积^[33]。道路网络与流域沟网的连接程度决定了道路对流域输沙量的大小。一般来说道路与沟道的距离较近且输移路径连通性好,则道路输沙潜力更大;反之,若路网与道路连接程度较小,二者距离较远且输移路径阻力较大,则道路输沙潜能较小^[4,52]。有学者通过对美国科罗拉多州中北部的国家森林中不同类型道路径流泥沙输移路径的实地监测,发现控制道路与河道的泥沙连通性强弱的关键因素为道路与河道的连接程度,道路废弃前后泥沙连通性都较好的路段皆为距离河流 10 m 以内的路段^[40];还有学者^[53]通过对道路侵蚀特征调查及路域周围淤积监测,发现流域大约 53% 的路网在水文上与河流相连接,这为道路侵蚀泥沙向河流转移提供了直接渠道,也就是相比其他未与河网连接的道路,这些道路所产生的超过 1/2 的污染物都被运输至河道。非硬化道路是流域高侵蚀率的景观要素,是流域河流淤积泥沙的重要贡献者^[54]。如,巴西南部 Arvorezinha 流域中占比 1% 的非硬化道路对河流泥沙的相对贡献率高达 36%^[55]。美国东北部 Winooski 河流域每年平均约有 16% 的沉积物可能来自未硬化的道路^[53];通过对汛期伊朗德黑兰北部 Koohsar 流域出口处泥沙来源的识别,发现非硬化道路是流域泥沙的重要来源^[54]。除此之外,由于道路部分结构的不稳定性,除道路路面外的部分也会向流域输送大量泥沙。土质道路的路堑和路堤边坡大都是土质堆积体,结构不稳固,在小雨情况下边坡就会形成出大量细沟。随着降雨事件的增多,细沟逐步发育,路堑和路堤会处于滑坡与崩塌的

高风险之中,而滑塌的土体积聚在路面又成为新的泥沙来源,向沟道输送^[56]。可见道路的不稳定边坡也在一定程度上增大了道路对流域泥沙的贡献。

3 道路侵蚀影响因素

道路侵蚀是自然条件和人为活动共同作用的结果,其中自然条件主要有驱动力因素(降水、风力、重力等)、道路自身因素及其他因素(主要指人类对道路使用、维护等)。

3.1 驱动力因素

道路侵蚀的动力因素包括水力、风力、重力与冻融作用及其不同的组合。道路水蚀的发生则与当地的降水情况紧密联系,但并不是每一场降雨都会引发侵蚀,只有当雨滴击溅侵蚀力和径流侵蚀力大于土壤抗蚀力时,侵蚀才会发生^[40,57]。降雨对道路的侵蚀作用主要是通过雨滴对道路的击溅及降雨产生径流汇集对道路的冲刷。降雨发生后,非硬化路面因其容重大、孔隙度小、径流系数大、渗透性能差等特点,路面结构易被破坏,随着径流积累会造成更剧烈的侵蚀。降雨及其所形成的径流汇聚至道路,引起道路各个部位泥沙迁移和侵蚀沟发育,严重时造成路段滑坡、崩塌和损毁。长时间持续性降雨会造成路面径流累积,路面侵蚀风险增大^[58]。在调查 2019 年台风“利奇马”暴雨所引起的道路侵蚀发现,无排水沟渠配置的非硬化路面作为地表径流的输排通道,在高强度降雨条件下侵蚀严重,部分道路基岩出露,其路面侵蚀沟均宽 3.05 m,侵蚀沟均深为 0.655 m。而硬化道路虽路面结构完整,但无浆砌石防护结构的路基多发生掏蚀现象,部分道路路基被冲毁^[42]。路面汇水一方面由降雨直接形成,另一方面是承接道路上方坡面来水。道路上方来水是导致道路侵蚀的重要因素。道路上方大量水流汇集,会对位于低平处的道路产生严重的冲刷,极易形成侵蚀沟,长此以往路面会发育出长达数米的切沟,导致道路损毁^[50]。有学者^[37,59]通过对施工便道进行研究发现,当道路上方有来水时,土质道路极易发生沟蚀,因为道路的存在改变了原坡面的产汇流机制,可使径流集中形成股流,对道路下坡处造成严重侵蚀形成切沟。此外,Chehla^[37]研究摩洛哥北部山区公路水土流失情况表明,路堑边坡水土流失与坡面径流长度关系紧密,即道路上坡面来水大小会显著影响道路侵蚀过程。重力因素对道路侵蚀的影响主要体现在,在强烈的地质活动或者暴雨条件下,道路路面塌陷、路基垮塌和道路边坡崩塌、崩岗、滑坡和泻溜^[60]。道路的重力侵蚀环境是在前期降雨条件下发育而来,一般来说重力侵蚀并不是单独

作用于道路。除此之外,风力作用和冻融作用也会影响道路侵蚀的发生。风力作用主要包括路面浮土侵蚀、道路风沙掩盖和渣土堆体在风力作用下的表土搬运。在风沙区,风力是导致区域内公路和铁路发生侵蚀的主要诱因,范庆春^[61]利用风沙区输沙能力与风速指标来分析铁路和公路不同工程单元的侵蚀淤积特征。冻融作用会致使高寒地区道路侵蚀危险性加大。冻融导致道路侵蚀发生的原因是高寒地区由于温度变化,冰雪融化和冻结的循环过程导致道路土壤内部的凝聚力被破坏,土体稳定性变差,冰雪融化后产生的径流也对路体有冲刷作用。冻融区域道路侵蚀是结合水蚀和冻融侵蚀的混合侵蚀模式,且冻融侵蚀力与重力共同作用下可能会造成路基下陷和边坡滑坡。徐宪立^[38]为明确青藏地区道路边坡的侵蚀规律,利用自然径流观测小区,估测公路边坡的年侵蚀模数,包括降雨侵蚀和冻融侵蚀,分别为 $108.91 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $11.13 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

3.2 道路自身因素

路面形态、路表特征、走向、长度、坡度、边坡配置等特征都显著影响着道路侵蚀的发生。路面作为承接上坡来水并作为过渡构件连通道路下方坡面,是道路系统输沙排水的重要通道,因此路面形态不同也决定了路面产汇流机制、产沙输沙模式和路面水动力学特性的差异性^[62]。

路面形态主要分为拱型、凹型、平直型和内/外倾型4种。拱型路面由于其自身结构特性导致雨后径流在路面上呈发散状态难以形成股流,大多数径流通过道路配套排水沟或自然排水沟排走,径流流速缓慢,剥蚀搬运泥沙能力有限,在雨强较小的情况下拱型路面产沙量最低;凹型路面可以很好地将降雨径流汇聚在低洼处,因存在坡度影响,径流携带能量大,流速快,侵蚀能力强,故凹型路面为4种路面中产沙量最高的;内倾型路面和外倾型路面由于有侧向坡度存在,径流运移方向与平直型路面有明显差异,能量消耗较大,径流流速较缓,一般情况下难以汇集,故产流产沙量介于凹型路面和拱型路面之间;平直型路面侵蚀具有较大随机性,侵蚀强弱程度与路面上已存在的细沟数量和细沟走向有较大关联性,且一旦细沟继续发育,路面会向凹型路面转变,造成更严重的侵蚀。此外,结构呈汇聚型的路面,由于长度增加,径流总量和动能也呈线性增加,侵蚀效应显著,严重时易形成大量冲沟毁坏道路。拱形等发散形路面,径流较分散,路面径流主要集中作用于沟道、路堑和路坡底部,而鲜少对路面造成严重破坏^[11,63]。道路表面特征的差异也会导致不同类型路面渗透能力与产流能力有

所不同。土壤质地与土壤抗蚀能力密切相关,是确定泥沙颗粒能否被剥蚀搬运的一个关键因素^[51]。当土壤黏粒含量高于 $30\% \sim 35\%$ 时,土壤颗粒间胶结力增大,抵抗侵蚀能力增强^[63]。一般来说当土壤中黏粒含量较少,粗颗粒较多时,土壤孔隙率大,垂向连通性较好,该类型土壤入渗量较大,而地表产流较少。

未经压实的路面往往存在一定厚度的浮土,由于浮土其特殊理化性质,路面渗透能力较低,即使在雨强很小时,短时间内也极易产生地表径流并引发路面侵蚀^[64]。而长期通行的道路被压实,路面结构稳定,一般情况下地表径流难以汇集形成股流,较浮土土路来说虽然压实路面产流量较大,但就侵蚀量来说,浮土土路远大于压实土路^[65-66]。

道路各个部位表面有无植被覆盖也是决定道路侵蚀产流产沙的重要因素。当土壤表层有植被覆盖时,植被存在可以增大土表糙度,具有加强拦截径流和减弱径流动能的功能,可以有效地起到抵御水蚀的作用^[67-69]。如对美国爱达荷州林区道路进行人工模拟降雨并监测,重新开放的道路因其路面植被覆盖减少而导致产沙量显著增加^[70];Martínez-Zavala^[71]的模拟降雨的结果表明土质道路的径流系数和侵蚀速率显著高于植被覆盖道路。在日常道路施工时,一般通过增加道路各个部位的植被覆盖,来维护道路结构,起到减弱侵蚀的作用^[6,71]。道路本身走向在很大程度上改变了道路径流泥沙输移情况。当流域道路与径流路径重叠时,道路走向与径流方向一致,会促进泥沙输移,加剧道路侵蚀发生。反之,道路会起到拦蓄径流与泥沙的作用,在一定程度上减弱了道路侵蚀。

道路长度和坡度是影响产沙和输沙的主要因素,坡度是对道路产沙影响最强的因子,坡度愈大,地表径流流速愈快,径流挟沙能力和动能愈强,产沙量愈大。邱荣祖^[72]通过对试验和调查数据的回归分析,建立了路面侵蚀量与时间、坡长、坡度的关系,并验证道路坡度、长度与道路侵蚀产沙量极显著相关。Black^[73]利用道路输沙量与距涵洞距离、道路坡度、土壤质地、路堑边坡高度等关系,根据坡度和长度的线性组合,推测路段侵蚀产沙量与路段长度和坡度有很好的正相关,与路堑边坡高度无关,强调了道路坡度对预测产沙的重要性。因此为减弱径流对路体的冲刷和侵蚀,在道路在设计 and 建设过程中,要控制坡度在一定范围内,在保证道路排水通畅的前提下,防治径流速度过大对道路边坡造成的冲刷和侵蚀。

此外,道路修建过程中形成的填、挖坡,在降雨条件下也极易发生土壤侵蚀现象。边坡土体分散不固

定,大都是道路建设过程中产生的废弃土渣,在降雨条件下极易发生侵蚀产沙,严重时堵塞路面,影响道路交通。不稳定路堑边坡易产生泥沙进入道路,从而增大路面可输沙量,道路边坡是流域长期重要的泥沙来源。Riley^[74]的研究表明,道路修建造成路堑边坡和填土斜坡的产沙量比自然山坡产沙量高 10 倍。还有研究发现道路填方坡的重力侵蚀是道路侵蚀泥沙的重要来源^[75]。

3.3 其他因素

除了道路侵蚀驱动力因素和道路自身特征外,人类活动也会对道路侵蚀产沙造成深刻的影响。道路本身作为连接各个区域的枢纽,一般情况下通过车辆实现交通功能。而道路侵蚀产沙与道路交通量关系密切^[40]。针对形态不稳定的土质道路而言,交通频繁路段,路面多存在大量车辙印,路面上车辙的存在是导致侵蚀加剧的重要原因。路面上有车辙的道路,即使在坡度很小时也会发生侵蚀,且形成固定形状,中部呈凸起状,两边为沟壑,当沟道下切严重时,道路交通会被阻断甚至废弃^[76]。而针对硬化道路而言,交通量较大的路段常伴有路面龟裂、车辙、局部隆起、路基下陷等特点,长此以往道路结构被破坏,路面开裂,侵蚀加剧^[77]。交通量高的路段的侵蚀产沙量显著大于低交通量路段,Leslie^[32]在克里尔沃特流域研究显示,流域内道路侵蚀量的 80% 都来自于交通频繁的路段。同时,人类生产活动也会对路面产生深刻的影响,农民耕作时农用车辆和农具的使用,会在路面上形成深浅不一的沟壑,沟壑易发育成下切严重的切沟,这也为路面侵蚀创造了适宜条件。

一方面人类频繁的活动加速了道路侵蚀,增加道路损毁的风险,另一方面人类定期对道路的维护工作也会改善侵蚀现状。针对土质路面,人类通过填平沟壑、压实路面、铺设砾石、开挖截排水沟、修建水窖等措施来改变路面径流汇聚状态,从而达到减弱侵蚀危害的目的。而硬化路面则通过人类对路面开展预防性养护、修复性养护、路面翻修、路面重建、修建径流拦蓄设施、截水沟、排水沟、沉砂池、道路护坡等工作来防治道路侵蚀^[78]。

4 道路侵蚀研究方法

4.1 实地监测

在实地监测方面,主要利用侵蚀针法、断面法、径流泥沙收集法,来研究不同路段的侵蚀产沙差异。

侵蚀针法是将测针垂直插入测量点的表层,分别记录侵蚀前后测针出露高度,以测针高度差表征侵蚀深度,并据此计算侵蚀量大小。邱荣祖^[72]利用侵蚀

针法对林地道路边坡的侵蚀进行监测,研究结果表明一般挖方边坡不发生沟蚀,填方边坡的个别路段会形成侵蚀沟。Arnfielz^[79]使用侵蚀针的方法监测了伊比利亚西部的 7 种山地道路的侵蚀情况,并据此估算不同道路年侵蚀率和季侵蚀率。

断面法是通过实测道路各部位侵蚀沟的长、宽、深来计算侵蚀沟体积,并结合道路容重来估算道路单位面积侵蚀量大小,以此研究不同类型道路侵蚀产沙差异的原因以及影响道路侵蚀产沙的主要因素。早在上个世纪就有学者利用断面法来衡量道路侵蚀强度,发现道路坡度和坡长与侵蚀量的三者间表现为幂函数的关系^[73];Salesa^[31]利用断面法计算了地中海山区山坡小道平均土壤侵蚀率,结果表明随坡度增大($6^{\circ}\sim 23^{\circ}$),道路侵蚀有增大的趋势,但当坡度处于 $24^{\circ}\sim 43^{\circ}$ 时,道路侵蚀的值具有很强的变异性,不遵循任何变化趋势。

径流泥沙收集法是利用截排水沟将路面径流泥沙引入路旁已布设的径流泥沙收集桶或人工修筑集水池,收集次降雨下路段产流产沙量,并据此分析不同类型道路产流产沙差异。如,Lima Farias^[35]使用收集桶对不同类型路面在降雨条件下所产生的径流泥沙进行收集,用含沙量大小来分析植被和交通量对道路侵蚀的影响。还有其他学者将不透水材料布设到道路沟道底部制作成泥沙沉淀池,以评估降水、降雨侵蚀力、坡度、地块长度和植被覆盖对产沙速率的影响^[39]。

针对不同部位道路侵蚀采取不同的方法,边坡部位利用侵蚀针进行侵蚀量的衡量,路面利用径流泥沙收集器收集径流泥沙,最后结合侵蚀特征调查(路面侵蚀沟特征、路基冲刷特征、排水沟侵蚀特征和泥沙输移痕迹)来综合评估道路侵蚀强度^[80]。由于道路附近的排水沟是路域内泥沙输移的重要途径,因此一些学者利用野外实测排水沟径流量、含沙量、淤积量等长期监测数据识别道路侵蚀热点路段^[32]。Takken^[81]通过调查道路排水沟特征(长、宽、深、过水面积、距离河流距离、连通特征),绘制道路径流泥沙输移路径图,进行风险评估,以突出高侵蚀风险路段,从而对不同道路进行修复评价。

4.2 模拟降雨/冲刷试验

人工模拟降雨/冲刷试验一般通过室内人工布设径流小区或者设置自然径流小区来模拟道路实况,在人工模拟降雨/径流条件下分别分析不同雨强、坡度、坡长等条件下,不同类型道路产流产沙差异性^[82]。通过模拟道路不同类型路面、不同道路路形、植被措施、工程措施对道路侵蚀产沙量的影响,为道路侵蚀

路面防治、道路配置改善提供合理依据^[19]。国内外学者在此方面进行了大量工作,Sosa-Pérez^[4]在模拟降雨条件下监测不同使用情况的道路,分析影响产生路面侵蚀的主要因素;王保一^[83]通过设置不同雨强和径流小区坡度,模拟公路路基边坡的产流产沙效应,结果表明雨强相同的情况下,坡度对坡面侵蚀的影响随雨强大小的变化而改变;小雨强时坡度是影响侵蚀产沙的主要因素,大雨强时降雨则成为主要因素。目前国内外模拟试验的技术具有方法成熟,数据获取周期短的优势,但至今模拟小区的边界效应未能消除,且研究局限于坡面尺度,以坡面数据为基础外推到更大尺度的方法并不可靠。

4.3 模型模拟

为更便捷地了解流域整个道路系统的侵蚀状况,学者们尝试利用已有大量监测调查和模拟试验的数据来建立道路侵蚀模型,通过设置不同模型参数来模拟不同区域的道路侵蚀发生过程^[18]。道路产沙模型分为经验统计模型与物理模型,经验统计模型源于大量的经验总结,是基于响应和自变量的统计关系,对监测资料的统计分析,确定出影响因素,并得出道路侵蚀产沙特征与各因素关系;而物理模型则是在物理

方程和水文学的基础上,用来描述道路泥沙产生的具体过程,各项物理参数可通过测量得来^[84-85]。常见的经验模型有 WARSEM, SEDMODL, ROADMOD, STJ-EROS, USLE 等,物理模型有 WEPP, KINEROS, DHSVM 等。随着模型研究的深入,模型已成为学者们研究道路侵蚀的主要方法,且为保证模型精度,学者们也开展了大量的模型优化工作(表 3—4)。如,史志华^[86]通过比较实地监测数据和 KINEROS2 模拟数据,发现湖北王家桥小流域内低级土质道路模拟效果优于村际道路,且侵蚀量与径流量的模拟精度皆 80% 以上。Skaugset^[84]研究发现,WARSEM, SEDMODL, RUSLE, WEPP 4 种模型所计算出的道路产沙量为实际道路产沙量的 2~8 倍,不同模型输入参数差异较大,导致其输出结果也存在显著差别。及莹^[87]进行 WEPP 模型气象数据本地化后,模拟凉山自然保护区内 20 个路段的侵蚀特征,发现道路产沙量与道路长度具有显著相关性。还有其他学者利用 ArcGIS 平台和 SEDMODEL 模型来预测和确定森林道路侵蚀风险区域并计算道路产沙量,再结合野外人工模拟降雨所获的产沙数据对模型参数进行修正^[88]。

表 3 不同土壤侵蚀模型子模块在道路侵蚀中的应用

模型名称	类型	地理位置	模型参数	模型功能	误差	误差原因
WEPP ^[87]	物理模型	黑龙江省凉水自然保护区	土壤质地;道路宽、长和截面类型;道路填挖坡长和宽;交通因素;道路坡度	模拟道路与河流的相交处侵蚀特征	—	—
RUSLE ^[90]	经验模型	浙江省诸暨	土壤可蚀性因子;降雨侵蚀力因子;道路长、宽;路堑边坡长、高和植被覆盖率;道路坡度	划分道路侵蚀风险等级	—	—
KINEROS2 ^[86]	物理模型	湖北省王家桥小流域	饱和导水率;土壤聚合系数;毛细管张力;雨滴溅蚀系数;曼宁系数	土质道路侵蚀的定量评估	误差位于 4.5%~31.8%	模型的修正主要是针对径流过程

表 4 不同类型道路侵蚀输移模型的应用

道路侵蚀模型	模型类型	地理位置	模型参数	模型功能	误差	误差原因
READI ^[78]	经验模型	美国加州北部	道路长度、宽度、坡度和路表粗糙度;土壤可蚀性因子;土壤和植被类型图	评估未经硬化的道路网对河流的侵蚀和水沙的输送	不能精确预测道路产沙量,但可明确不同类型道路间的相对产沙差异	DEM 和道路矢量数据的精度
WARSEM ^[18,84]	经验模型	澳大利亚东南海岸	路面性质;地质侵蚀因子;年平均降雨量;道路长、宽;路形;路堑边坡长、高和植被覆盖率;交通因素;道路坡度	量化不同道路侵蚀产沙	高估了实测产沙量较低路段的产沙量	交通和路面因素等敏感因素的高估;未明确森林道路的水文状况
SEDMODL ^[91]	经验模型	地中海地区	地质侵蚀因子;年均降雨量;道路宽度、长度和截面类型;路堑边坡长、高及植被覆盖率;交通因素;道路坡度;	识别产沙潜力大的路段	过度预测产沙量	道路信息不完整

除上述几种方法之外,近年来指纹识别技术也被广泛应用于土壤侵蚀研究之中,其主要原理是筛选不同潜在泥沙源物质中差异明显的指纹因子,通过对比指纹因子的方法确定泥沙汇与潜在泥沙源的对应关

系,分析汇集区域泥沙的来源和泥沙源区土壤运移的动态过程,并以泥沙源区指纹因子的损失率或泥沙汇集区指纹因子的富集率来确定区域土壤侵蚀量或沉积量^[89]。目前已有研究利用该技术,对流域出口处的

淤积泥沙进行来源追溯,来评估未硬化道路对流域侵蚀产沙的贡献度^[63]。但实际流域内部泥沙运移过程受地形、人为活动等因素影响,这使泥沙路径具有不连续和发散的特点,因此指纹识别技术在确定道路产沙量大小和道路泥沙的输移机制方面具有一定的缺陷性。且由于流域道路类型众多,不同类型道路泥沙来源有明显差异,实地监测和后续泥沙分析工作繁重,故该技术在道路侵蚀研究中的应用尚在起步阶段。

5 研究展望

(1) 道路侵蚀研究方法方面,国内大部分研究都基于人工模拟降雨试验,长期的野外定位观测较少。人工降雨模拟道路侵蚀试验都是处于一种理想化状态,与实际道路侵蚀过程差异较大。而国外近些年致力于道路产沙模型的创建和修正,但目前的道路侵蚀输移模型多针对不同类型道路路面侵蚀的模拟,鲜少涉及到道路路堤、路堑和路基产沙情况,且多数模型具有明显的地域性,加之模型开发过程中所使用的原始数据都来源于某一特定的研究区域,模型可推广性较差。指纹识别技术无法量化流域道路侵蚀程度,未能对道路个体的产沙情况和输沙路径进行分析,只考虑了整个路网系统对流域产沙的总体影响。故对道路侵蚀的研究应在改进研究方法的基础上加强野外监测工作,在大量野外监测数据的基础上,对原有道路侵蚀输移模型进行修正与改进,选择更合适的道路侵蚀模型参数,提高模型的适用性和精准性。此外,利用获取数据便捷的无人机航拍技术与遥感技术来快速提取模型建模数据,可尝试将侵蚀模型推广到更大尺度的道路侵蚀研究中。同时,为进一步探究道路侵蚀所产生的泥沙在流域内部的输移动态,可利用指纹识别技术并结合泥沙连通性概念来确定泥沙输移的潜在路径,以此达到识别道路泥沙实际运移路径和量化道路存在对流域泥沙输移的促进(阻碍)程度。

(2) 道路侵蚀研究对象方面,国内外的研究多集中于对单个道路路段或其某个部位,尚未充分考虑道路作为一个整体与流域的交互作用和由于道路的存在对流域内部泥沙输移和水文过程的影响。且长期以来缺乏对道路除路面以外部分(路堑、路堤和路基)的针对性研究,未能对道路侵蚀系统有全面的认识和理解。因此,今后的研究要关注道路除路面外其他部位的产流产沙情况,需加强对道路个体不同部位侵蚀的监测与分析研究。既要研究单个路段侵蚀特征与过程,探明道路不同部位的侵蚀发生的原因和侵蚀差异性,还要从整体分析路网存在对整个流域侵蚀过程

的影响,明确道路单独个体和道路网络整个系统在流域中对径流泥沙输移的“开关”作用,揭示道路对流域水文和泥沙连通性的影响机制。

(3) 道路侵蚀防治方面,目前的防治措施主要是先确定主导道路发生侵蚀的影响因素和侵蚀高发部位,再通过实施工程和植物措施,拦截路面径流泥沙来抑制侵蚀,最终目的是为流域管理提供合理的道路防治措施和服务于水土保持方案编制。而且考虑到时间和经济成本,现阶段防治性研究开展多数是围绕硬化道路进行,而应用于低级土质道路的防治措施较少。未来道路侵蚀防治工作不局限于机理性研究,应注重将道路侵蚀防治理论运用实际道路建设之中,不仅要重点保护硬化道路免遭侵蚀,也要因地制宜地提出防治低级土质道路水土流失的措施和方法并推广应用,以此为保障道路系统安全、流域生态环境优化和社会稳固发展提供重要的工作基础。

[参 考 文 献]

- [1] Lal R. Soil degradation by erosion [J]. *Land Degradation & Development*, 2001, 12(6):519-539.
- [2] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].*土壤学报*,2020,57(5):1117-1127.
- [3] Drejza S, Bernatchez P, Guillaume M, et al. Quantifying road vulnerability to coastal hazards: Development of a synthetic index [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2019,181:104894.
- [4] Sosa-Pérez G, MacDonald L H. Effects of closed roads, traffic, and road decommissioning on infiltration and sediment production: A comparative study using rainfall simulations [J]. *Catena*, 2017,159:93-105.
- [5] Jingshu W, Jinhui J H, James L, et al. A study of the road sediment build-up process over a long dry period in a megacity of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,696:133788.
- [6] Joaquín N H, Teresa R L F, JoséC A, et al. Soil erosion in steep road cut slopes in Palencia (Spain) [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(2): 190-199.
- [7] Forman R T T, Reineking B, Hersperger A M. Road traffic and nearby grassland bird patterns in a suburbanizing landscape [J]. *Environmental Management*, 2002, 29(6): 782-800.
- [8] Jones J A, Swanson F J, Wemple B C, et al. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks [J]. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 76-85.
- [9] Lee S J, Park H S, An K G. Preliminary environmental impact assessments on fish compositions and the ecological health of Jeokbyeok River on the road construction of

- Muju-Geumsan region [J]. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 2017, 26(1):27-43.
- [10] 赵龙山,樊春华,李开凤.乡村聚落土壤侵蚀环境与水土流失研究综述[J].*中国水土保持科学*,2019,17(6):140-147.
- [11] 郑世清,周保林,赵克信.长武王东沟试验区沟坡道路侵蚀及其防蚀措施[J].*水土保持学报*,1994,8(3):29-35.
- [12] 郑世清,霍建林,李英.黄土高原山坡道路侵蚀与防治[J].*水土保持通报*,2004,24(1):46-48.
- [13] 查小春,甘枝茂.陕北多沙粗沙区乡村聚落土壤侵蚀研究[J].*干旱区资源与环境*,2007,21(5):112-115.
- [14] Ramos-Scharrón C E, MacDonald L H. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, U. S. Virgin Islands [J]. *Catena*, 2007, 71(2): 250-266.
- [15] 徐宪立,张科利,刘宪春.道路侵蚀研究进展[J].*地理科学进展*,2006,25(6):52-61.
- [16] 张科利,徐宪利,罗丽芳.国内外道路侵蚀研究回顾与展望[J].*地理科学*,2008,28(1):119-123.
- [17] Anderson D M, Macdonald L H. Modelling road surface sediment production using a vector geographic information system [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(2): 95-107.
- [18] Fu B, Newham L T H, Ramos-Scharrón C E. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(1): 1-14.
- [19] 秦百顺,李占斌,李鹏,等.扰动土与非硬化道路侵蚀产沙规律研究[J].*西安理工大学学报*,2012,28(2):138-144.
- [20] 詹松,王文龙,黄鹏飞,等.非硬化路面与原生地面侵蚀水动力参数对比研究[J].*水土保持通报*,2014,34(2):1-6.
- [21] 徐学选,据彤军,郑世清.延安燕沟流域次降雨泥沙来源分析[J].*中国水土保持科学*,2008,6(3):38-42.
- [22] Bodoque J M, Ballesteros-Cánovas J A, Rubiales J M, et al. Quantifying soil erosion from hiking trail in a protected natural area in the Spanish Pyrenees [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7): 2255-2267.
- [23] Robert S, Shipley S, Hovanitz E, et al. Effects of off-road vehicles in Ballinger Canyon, California [J]. *Geology*, 1979, 7(1): 19-21.
- [24] Johnson C W. Soil loss caused by Off-road vehicle use on steep slopes [J]. *Transactions of the Asae*, 1983, 26(2):402-405.
- [25] Sack D, Da Luz S. Sediment flux and compaction trends on off-road vehicle (ORV) and other trails in an Appalachian forest setting [J]. *Physical Geography*, 2003, 24(6): 536-554.
- [26] Bodoque J M, Diez-Herrero A, Martín-Duque J F, et al. Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: two examples from Central Spain [J]. *Catena*, 2005, 64(1): 81-102.
- [27] López-Vicente M, Navas A. Predicting soil erosion with RUSLE in Mediterranean agricultural systems at catchment scale [J]. *Soil Science*, 2009, 174(5): 272-282.
- [28] López-Vicente M, Poesen J, Navas A, et al. Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees [J]. *Catena*, 2013, 102:62-73.
- [29] Kathryn R K, W Michael A, Copenheaver C A. Recreational stream crossing effects on sediment delivery and macroinvertebrates in southwestern Virginia, USA [J]. *Environmental Management*, 2014, 54(3): 505-516.
- [30] Ramos-Scharrón C E, Reale-Munroe K, Atkinson S C. Quantification and modeling of foot trail surface erosion in a dry sub-tropical setting [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(13): 1764-1777.
- [31] Salesa D, Cerdà A. Four-year soil erosion rates in a running-mountain trail in eastern Iberian Peninsula [J]. *Geographical Research Letters*, 2019, 45(1): 309-331.
- [32] Leslie M, Thomas D. Sediment production from forest road surfaces [J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(11): 1753-1761.
- [33] Sidle R C, Sasaki S, Otsuki M, et al. Sediment pathways in a tropical forest: Effects of logging roads and skid trails [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(4): 703-720.
- [34] Brown K R, Michael A W, McGuire K J. Sediment delivery from bare and graveled forest road stream crossing approaches in the Virginia Piedmont [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310:836-846.
- [35] Farias T R L, Medeiros P H A, Navarro-Hevia J, et al. Unpaved rural roads as source areas of sediment in a watershed of the Brazilian semi-arid region [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2019, 34(5):475-485.
- [36] De Oña J, Ferrer A, Osorio F. Erosion and vegetation cover in road slopes hydroseeded with sewage sludge [J] *Transportation Research (Part D): Transport and Environment*, 2011, 16(6):465-468.
- [37] Chehlafi A, Kchikach A, Derradji A, et al. Highway cutting slopes with high rainfall erosion in Morocco: Evaluation of soil losses and erosion control using concrete arches [J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105200.
- [38] 徐宪立,张科利,庞玲,等.青藏公路路堤边坡产流产沙规律及影响因素分析[J].*地理科学*,2006,26(2):211-216.

- [39] Ramos-Scharrón C E. Sediment production from unpaved roads in a sub-tropical dry setting: Southwestern Puerto Rico [J]. *Catena*, 2010, 3(82):146-158.
- [40] Sosa-Pérez G, MacDonald L H. Reductions in road sediment production and road-stream connectivity from two decommissioning treatments [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 398:116-129.
- [41] Zhang Yan, Zhao Yiyang, Liu Baoyuan, et al. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 284: 106580.
- [42] 从辰宇, 韩剑桥, 焦菊英, 等. 台风“利奇马”暴雨引发的土壤侵蚀调查研究: 以山东省临朐县为例 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5):337-344.
- [43] 王伯勤, 高建恩, 李书钦, 等. 黄土高原不同道路的水沙响应模拟试验研究 [J]. *人民长江*, 2009, 40(16):88-91.
- [44] 朱宝才, 黄鹏飞, 王文龙, 等. 黄土高原沟壑区道路排水沟侵蚀产沙试验 [J]. *草地学报*, 2015, 23(5):978-982.
- [45] Yang Hongjuan, Yang Taiqiang, Zhang Shaojie, et al. Rainfall-induced landslides and debris flows in Mengdong town, Yunnan Province, China [J]. *Landslides*, 2020, 17(4): 931-941.
- [46] Guo Wenzhao, Bai Yun, Cui Zhiqiang, et al. The impact of concentrated flow and slope on unpaved loess: road erosion on the Chinese Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(2):914-925.
- [47] Fryirs K, Gore D B. Geochemical insights to the formation of “sedimentary buffers”: Considering the role of tributary-trunk stream interactions on catchment-scale sediment flux and drainage network dynamics [J]. *Geomorphology*, 2014, 219:1-9.
- [48] de-Vente J, Poesen J, Bazzoffi P, et al. Predicting catchment sediment yield in Mediterranean environments: The importance of sediment sources and connectivity in Italian drainage basins [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(8): 1017-1034.
- [49] 韩小波, 朱悫, 李超, 等. 三峡库区土质道路侵蚀与污染物传输特征分析 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(S2): 534-539.
- [50] Cerdà A. Soil water erosion on road embankments in Eastern Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378(1/2):151-155.
- [51] Arnáez J, Larrea V, Ortigosa L. Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in Northeastern Spain [J]. *Catena*, 2004, 57(1): 1-14.
- [52] Mancini D, Lane S N. Changes in sediment connectivity following glacial debuitressing in an Alpine valley system [J]. *Geomorphology*, 2020, 352:106987.
- [53] Wemple B C, Clark G E, Ross D S, et al. Identifying the spatial pattern and importance of hydro-geomorphic drainage impairments on unpaved roads in the Northeastern USA [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(11): 1652-1665.
- [54] Nosrati K, Collins A L. Investigating the importance of recreational roads as a sediment source in a mountainous catchment using a fingerprinting procedure with different multivariate statistical techniques and a Bayesian unmixing model [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 506-518.
- [55] Minella J P G, Merten G H, Walling D E, et al. Changing sediment yield as an indicator of improved soil management practices in Southern Brazil [J]. *Catena*, 2009, 79(3): 228-236.
- [56] 杨波, 王文龙, 张闯娟, 等. “7·26”暴雨下不同土地利用坡面浅沟沟槽发育特征及体积估算 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9):121-128.
- [57] 艾宁, 魏天兴, 朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2):26-30.
- [58] Ziegler A D, Sutherland R A, Giambelluca T W. Runoff generation and sediment production on unpaved roads, footpaths and agricultural and land surfaces in northern Thailand [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(5):519-534.
- [59] Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, et al. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(12):1267-1283.
- [60] Alder S, Prasuhn V, Liniger H, et al. A high-resolution map of direct and indirect connectivity of erosion risk areas to surface waters in Switzerland: A risk assessment tool for planning and policy-making [J]. *Land Use Policy*, 2015, 48:236-249.
- [61] 范庆春, 奚成刚. 风沙区道路路基风力侵蚀和沉积特征 [J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2010, 6(10):340-341.
- [62] 王天巍, 余冰, 刘窑军, 等. 农村土质道路路面形态对道路侵蚀的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19):162-168.
- [63] 刘窑军, 王天巍, 蔡崇法, 等. 三峡库区低等级土质道路侵蚀研究 [J]. *水科学进展*, 2015, 26(2):169-177.
- [64] Kirkby M. Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion [J]. *Catena*, 2002, 46(2/3):89-102.
- [65] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 野外模拟降雨条件下矿区土质道路径流产沙及细沟发育研究 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24):155-163.
- [66] 纪丽静, 王文龙, 康宏亮, 等. 黄土区薄厚层浮土土质

- 道路降雨侵蚀过程差异[J].土壤学报,2021,58(1):92-105.
- [67] 聂慧莹,王文龙,李建明,等.黄土区薄层浮土道路侵蚀试验研究[J].自然灾害学报,2020,29(1):104-114.
- [68] 黄张玲.植被恢复对路堑边坡侵蚀及土壤理化性质的影响研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2013.
- [69] 刘窑军,王天巍,蔡崇法,等.植被措施与路面汇水对三峡库区土质道路边坡侵蚀影响[J].水科学进展,2014,25(1):98-105.
- [70] Foltz R B, Copeland N S, Elliot W J. Reopening abandoned forest roads in Northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(8):2542-2550.
- [71] Martínez-Zavala L, Jordán L A, Bellinfante N. Seasonal variability of runoff and soil loss on forest road back-slopes under simulated rainfall [J]. Catena, 2008, 74(1):73-79.
- [72] 邱荣祖,王玉明,康文和.山地林道路面土壤侵蚀的研究[J].森林工程,1997,13(4):44-46.
- [73] Black C H, Luce A. Sediment production from forest roads in western Oregon [J]. Water Resources Research, 1999,35(8):2561-2570.
- [74] Riley S J. New South Wales. Soil loss from road batters in the Karuah State Forest, Eastern Australia[J]. Soil Technology, 1988,1(4):313-332.
- [75] 张新和.我国道路建设中水土流失问题研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [76] Ramos Scharrón C E. Land disturbance effects of roads in runoff and sediment production on dry-tropical settings [J]. Geoderma, 2018,310:107-119.
- [77] 余炎新.水泥道路路面破坏的原因及其防治[J].黑龙江交通科技,2010,33(3):65-67.
- [78] Benda L, James C, Miller D, et al. Road erosion and delivery index (READI): A model for evaluating unpaved road erosion and stream sediment delivery [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2019,55(2):459-484.
- [79] Arnaez J, Larrea V. Erosion processes and rates on road-sides of hill-roads(Iberian System, La Rioja, Spain [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1995,20(3/4):395-401.
- [80] Pieter J B, Franssen C J, Phillips B. Forest road erosion in New Zealand: Overview [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001,26(2):165-174.
- [81] Takken I, Croke J, Lane P. A methodology to assess the delivery of road runoff in forestry environments [J]. Hydrological Processes, 2008,22(2):254-264.
- [82] 沈海鸥,刘健,王宇,等.降雨强度和坡度对黑土区土质道路路面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):123-126.
- [83] 王保一,张荣华,荆莎莎,等.降雨和坡度对路基边坡产流产沙的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(2):114-120.
- [84] Skaugset A E, Surfleet C G, Meadows M W, et al. Evaluation of erosion prediction models for forest roads [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011,2203:3-12.
- [85] 乌玲瑛,严力蛟.基于 GIS 和 RUSLE 模型道路对土壤侵蚀格局的影响研究:以浙江省杭金衢高速诸暨段为例[J].生态学报,2014,34(19):5659-5669.
- [86] 史志华,方怒放,李璐,等.应用 KINEROS2 模型对土质道路侵蚀过程的模拟[J].地理研究,2010,29(3):408-415.
- [87] 及莹,蔡体久.利用 WEPP 模型模拟凉水自然保护区部分道路侵蚀对河流泥沙含量影响特征[J].安徽农业科学,2014,42(5):1479-1481,1519.
- [88] Parsakhoo A, Lotfalian M, Kavian A, et al. Prediction of the soil erosion in a forest and sediment yield from road network through GIS and SEDMODL [J]. International Journal of Sediment Research, 2014, 29(1):118-125.
- [89] 郭进,文安邦,严冬春,等.复合指纹识别技术定量示踪流域泥沙来源[J].农业工程学报,2014,30(2):94-104.
- [90] 乌玲瑛.基于 GIS 和 RUSLE 模型的道路对土壤侵蚀格局影响研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2013.
- [91] Akay A E, Erdas O, Reis M, et al. Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques [J]. Building and Environment, 2008, 43(5):687-695.