

DOI: 10.5846/stxb201301190120

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. 生态学报, 2014, 34(19): 5659-5669.

Wu L Y, Yan L J. Impact of road on soil erosion risk pattern based on RUSLE and GIS: a case study of Hangjinqi highway, Zhuji section. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5659-5669.

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

乌玲瑛, 严力蛟*

(浙江大学生命科学学院生态研究所, 杭州 310058)

摘要:以浙江省诸暨市为研究区域,以杭金衢高速公路诸暨段为研究对象,以研究区的 DEM、降雨、土壤类型、遥感图、道路图等数据为基础,运用 GIS 和 RUSLE 模型分析了该公路建设前后诸暨市的土壤侵蚀风险分布格局。此外,采用缓冲区分析的方法,对比高速公路周围的土壤侵蚀风险等级的变化情况,以此分析在高速公路影响域内土壤侵蚀等级分布规律,并进一步探求高速公路对土壤侵蚀的影响范围,在此基础上提出具有针对性的土壤侵蚀防治措施。其主要结果如下:(1)根据 RUSLE 模型计算获得诸暨市土壤侵蚀模数 A 的取值,1999 年诸暨市的土壤侵蚀量模数在 $0\text{--}380.02\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间;2003 年诸暨市的土壤侵蚀量模数在 $0\text{--}572.94\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间,2003 年诸暨市的土壤侵蚀量以及土壤侵蚀风险等级均高于 1999 年。(2)通过缓冲区分析,年际间变化表明高速公路建设增加了土壤侵蚀量,加剧了高速公路附近的土壤侵蚀风险,极强度侵蚀和剧烈侵蚀等级的响应最强烈,而高速公路单侧 660m 的范围则是剧烈侵蚀的影响范围,以此视为防治重点区域。(3)通过成因分析可知,由公路建设导致的景观破碎化加剧和建设用地比例增加是引起剧烈侵蚀增加的重要原因,因此高速公路的水土保持需要重点从这两方面入手,采取相应措施。

关键词: RUSLE; GIS; 高速公路; 土壤侵蚀

Impact of road on soil erosion risk pattern based on RUSLE and GIS: a case study of Hangjinqi highway, Zhuji section

WU Lingying, YAN Lijiao*

Institute of Ecological Planning and Landscape Design, College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: This study adopted GIS and Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) methods to analyze the risk pattern of soil erosion in the affected road zone of Hangjinqi highway in Zhuji City, Zhejiang Province. Digital Elevation Model (DEM) data, rainfall records, soil type data, remote sensing imaging, and a road map of Hangjinqi highway were used for these GIS and RUSLE analyses. Additionally, the soil erosion situations before and after the construction of this highway were compared by using buffer analysis, which was done by setting a series of buffer gradients and calculating the soil erosion patterns of these buffer gradients. According to the change of these soil erosion patterns within the buffer gradient, the effective distance of highway was also determined, and some prevention suggestions were given accordingly. This study came to the following four conclusions: (1) The estimated average soil loss A ($\text{t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$), according to the RUSLE

基金项目: 国家自然科学基金 (40671117, 40771117); 国家 863 项目 (2007AA10Z220); 农业部面源污染控制重点开放实验室资助项目 (KYJD09021)

收稿日期: 2013-01-19; **网络出版日期:** 2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanlj@zju.edu.cn

results, was 0—380.02 t hm⁻² a⁻¹ before highway construction and was 0—572.94 t hm⁻² a⁻¹ after highway construction, demonstrating that soil erosion and soil erosion risk levels were all higher following completion of the highway construction; (2) The results of the buffer analysis indicated that highway construction was the main reason for the increase in soil erosion along the affected area of highway, and the severe grade of erosion change was most dramatic. The degree of soil erosion changed especially dramatically within 660 meters of the highway, so this area should be identified as the key area in which necessary soil and water conservation measures should be taken to prevent soil erosion; (3) The soil erosion was significantly correlated with the degree of landscape fragmentation and the proportion of build-up area, as shown through cause analysis. Therefore, the increases in the degree of landscape fragmentation and the proportion of build-up area were important contributors to severe grade erosion. These two aspects merit particular focus, and necessary measures should be taken in order to protect soil and water conservation beside the highway. Such measures might include choosing special plant species which can help to prevent soil erosion, changing planting patterns, and increasing the vegetation coverage, which can be done through crop rotation and intercropping methods.

Key Words: RUSLE; GIS; highway; soil erosion

土壤侵蚀是当今世界面临的一个全球性生态环境问题,也已经成为全球生态环境研究的核心内容。高速公路施工过程会改变沿线原有的地形地貌,破坏地表植被和岩土结构,产生裸露土壤表层,降低了土壤的抗侵蚀能力^[1-6]。当高速公路建成之后,对局部地貌,特别是土地利用类型产生了不可逆的改变,高速公路的切割作用加深景观破碎化程度,加剧土壤侵蚀程度,原先可用于涵养雨水的土壤和植被变为不透水面,雨水和地表径流的直接冲刷增强了降雨对高速公路周边土壤的侵蚀力,增加了土壤侵蚀的风险,影响周围景观及生态敏感区,降低了生态系统的安全性^[7]。由于土壤侵蚀的巨大危害以及目前道路系统的快速发展,对高速公路土壤侵蚀的机理研究以及监测和治理就显得尤为必要。

国外学者早在 1970 年就开始关注道路建设与环境问题,Batra 研究了灌木与草本植物对土壤侵蚀的防治功效,认为草本植物效果更好^[8]。Turner 研究了道路建设与滑坡的关系并分析成因^[9]。Luce 研究发现道路建设所形成的硬地面会极大降低地表的入渗能力,易于形成坡面漫流^[10]。Jones 等发现道路修建会导致土壤侵蚀量大大增加^[11]。Forman 分析了道路对水文及整个生态环境的影响,指出道路修建会加快土壤侵蚀的过程,自然灾害和地质灾害也会频繁发生^[12]。

虽然我国学者也积极开展公路土壤侵蚀的研究,但是目前关于高速公路建设土壤侵蚀规律的研究还略显不足,缺少系统地关于其内在机理的探讨,

过多地从工程建设的角度来分析成因并提出防治措施,而缺少从定量化的角度进行对比研究。所以本研究试图从人类作用强烈的高速公路入手,从土地利用类型改变的角度切入,探讨高速公路建设对土壤侵蚀的影响。

目前 RUSLE 和 GIS 结合来对土壤侵蚀进行定量估算的研究也已较为丰富,以 RUSLE 模型为预测工具,借助 GIS 强大的空间数据处理能力,在较大空间尺度上对于土壤侵蚀状况以及侵蚀敏感性等特征进行研究^[13]。本研究正是凭借 GIS 在地理信息中出色的处理能力,对高速公路土壤侵蚀的各个因子进行有效管理和综合计算,借助 RUSLE 模型强大的适用性和综合能力来计算土壤侵蚀风险,采取缓冲区分析的办法探求高速公路对土壤侵蚀的影响范围,并通过景观格局分析的办法验证公路土壤侵蚀与景观破碎化的关系,以期防治公路建设及其建成后引起的土壤侵蚀提供相关的理论依据和数据支持。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况

诸暨市位于浙江省中部偏北,钱塘江流域中段,介于东经 119°53′—120°32′,北纬 29°21′—29°59′之间。诸暨市属亚热带季风气候区,四季分明,年温差大于同纬度邻县,小气候差距显著。常年平均气温 16.3℃。雨水较多,常年降水量平均为 1373.6mm,且分布不均,3—6 月和 9 月为多雨季,其中 6 月中下旬

降雨量相对集中,7—8 月和 10 月至翌年 2 月为少雨季。

1.2 研究对象概况

本研究选取了杭金衢高速诸暨段作为研究对象。杭金衢高速公路起自杭州萧山红垦农场,与沪杭甬高速公路相连,止于常山县窑上,沿线经过 12 个县(市、区),全长 290km,是浙江穿越县市最多的高速公路。杭金衢高速公路始建于 1999 年,于 2003

年投入运营。

1.3 数据收集及处理

1.3.1 土壤数据

数据来源于中科院南京土壤研究所 2002 年制作的中国 1:100 万土壤数据库,以 GIS 形式提供全国共 72567 斑块的土壤信息,每个斑块包含的信息如表 1 所示。对土壤数据库中的土壤信息进行筛选使之符合 RUSLE 模型计算的需要。

表 1 1:100 万土壤数据库所含信息

Table 1 Information in 1:1000000 soil database

类别 Type	具体信息 Information
斑块基本信息 Patch basic information	斑块面积、斑块周长,中心经度、中心纬度
土壤类型 Soil type	土壤编码、亚类名称、剖面编码、剖面厚度
土壤母质组成 Soil parent material/%	石砾、粗砂、细砂、粉砂、粘粒
土壤化学性质及养分 Chemical property and nutrient of soil	有机质、pH 值、全氮、全磷、全钾

1.3.2 土地利用数据

从国际科学数据服务平台 (datamirror.csdb.cn) 下载 1999 年和 2003 年诸暨市遥感图像,使用 Erdas 软件进行遥感解译,分类出 6 种土地利用类型:水田、旱地、林地、荒草地、水域及建设用地,分辨率为 30m×30m。

1.3.3 高程图

从国际科学数据服务平台网站 (datamirror.csdb.cn) 下载得到诸暨市高程图,分辨率为 30m×30m,使用 Arcgis 软件进行处理,使之符合 RUSLE 模型计算的需要。

1.3.4 年降雨量数据

降雨数据来源于国家气象局数据共享中心 (<http://cdc.cma.gov.cn/>)。以浙江省 18 个气象站的 1999 和 2003 年的日值降雨数据为基准,通过 Arcgis 软件进行插值,得到诸暨市 1999 年和 2003 年的年降雨数据。

1.3.5 高速公路数据

高速公路数据来源于 2003 年的诸暨市交通图,选取杭金衢高速诸暨段作为研究对象,进行数字化和地理校正。

2 研究方法

2.1 RUSLE 模型计算

RUSLE 模型 (The Revised Universal Soil Loss Equation),即修正的通用土壤流失模型,是美国农业

部自然资源保护局 (NRCS) 于 1997 年正式决定实施的,该模型具有结构简洁,参数物理意义明确,计算简单的优点^[14],在世界范围得到了推广和应用^[15]。

其计算表达式为:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中, A 为预测土壤侵蚀量,主要指由降雨和径流引起的坡面细沟或细沟间侵蚀的年均土壤流失量; R 为降雨侵蚀力,反映降雨引起土壤流失的潜在能力; K 为标准小区条件下土壤可蚀性,是衡量土壤抗蚀性的指标,用于反映土壤对侵蚀的敏感性; LS 为坡长与坡度因子,其中 L 为坡长因子, S 为坡度因子,二者合起来表示在其它条件不变的情况下,某个确定坡长和坡度的表面上土壤流失量和标准径流小区典型坡面上土壤流失量的比值; C 为覆盖与管理因子,用来衡量植被覆盖和经营管理对土壤侵蚀抑制作用; P 为水土保持措施因子,即采取水土保持措施后的土壤流失量与顺坡种植土壤流失量的比值。

2.1.1 R 因子提取

从国家气象局网站下载得到的是日值降雨数据,故采用基于日降雨量的侵蚀力算法^[16]:

$$E_j = \alpha [1 + \eta (2\pi f \times j - \omega)] \sum_{j=1}^N R_k^\beta R_k > R_0 \quad (2)$$

式中, E_j 为月降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$), R_k 为第 k 日降雨量, R_0 为临界降雨量,一般的取值为 12.7mm, N 则是对应月份的日降雨量超过 R_0 的天

数。频率 $f = \frac{1}{12}$, $\omega = \frac{7}{6}$ 。 α, β 为模型参数。本研究选用郭新波等人用兰溪站的资料计算得到的参数值^[16]: $\alpha = 0.0043$, $\eta = 48.13$, $\beta = 1.09$ 来计算得到 R

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left(\frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1})} \right) \quad (3)$$

式中, SAN、SIL、CLA 和 C 分别代表了砂粒、粉粒、粘粒和有机碳的含量(%), 而 $\text{SN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。根据之前获得的土壤数据, 确定 SAN、SIL、CLA 和 C 的数值, 以土壤质地为成图单元, 形成 K 因子分布图。

2.1.3 LS 因子提取

LS 因子实质上包含了两个方面: 坡长因子 L 和坡度因子 S , 其中 L 因子的计算参考 Wischmeier 和 Smith 于 1978 提出的经典公式^[18], 具体表达式为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^{\alpha} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (5)$$

$$\beta = \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right) / [3.0 (\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \quad (6)$$

式中, λ = 水平坡长; α = 坡长指数; θ = 用 DEM 提取的坡度。

因子分布图。

2.1.2 K 因子提取

鉴于本研究获得的数据, 选用侵蚀/生产力影响模型 EPIC 进行 K 因子的计算^[17]:

S 因子的公式则参考 McCool 等人于 1987 年提出的公式^[19], 并结合我国学者刘宝元于 1994 年提出了陡坡 S 因子计算公式^[20]:

$$\begin{cases} S = 10.8 \times \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ S = 16.8 \times \sin \theta - 0.50 & (5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ) \\ S = 21.91 \times \sin \theta - 0.96 & (\theta > 10^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

式中, θ 为坡度角。

参照以上公式, 在 Arcgis 软件的支持下, 形成了 L 因子与 S 因子的分布图。

2.1.4 C、P 因子提取

C 、 P 因子的计算由于涉及到不同细分因子的综合作用而显得较为复杂, 但由于其已经历较长时间的发展, 现在算法较为成熟, 目前主要是依据土地利用类型赋值的方法确定 C 、 P 值。本研究参考了多篇研究论文后, 采用表 2 的 C 、 P 因子取值^[21-24]。

表 2 不同土地利用类型 C 、 P 因子值

Table 2 C values and P values of different land use types

土地利用类型 Landuse type	水田 Paddyfield	旱地 Dry land	林地 Forest land	水域 Water	城镇居民点建设用地 Construction land	荒草地 Grassland
C	0.1	0.21	0.006	0	0.2	0.08
P	0.01	0.25	0.5	0	1	0.2

根据 RUSLE 各因子的取值, 将各因子相乘, 得到诸暨市 1999 年和 2003 年两年的土壤侵蚀分布图。根据中国土壤侵蚀强度等级划分标准^[25], 得到诸暨的土壤侵蚀等级分布情况。

2.2 缓冲区分析

本研究对于杭金衢高速缓冲区分析的范围采用国际上常用标准(表 3), 表中的缓冲带数值是没有加入高速公路本身宽度的单侧宽度^[26]。以 60m 作为步长, 围绕杭金衢高速设置一系列道路缓冲区, 从 60m 直至 1200m。在 RUSLE 模型计算得到诸暨市土壤侵蚀格局的基础上, 获得道路缓冲梯度下的土壤侵蚀格局分布图。通过对比一系列土壤侵蚀格局

图, 探讨高速公路对土壤侵蚀的影响并分析其原因。

2.3 景观指数分析

为了探讨高速公路土壤侵蚀对景观破碎化的影响, 引入景观格局指数来建立公路土壤侵蚀和景观破碎化之间的定量化联系。本研究是利用景观格局分析软件 Fragstat 3.3 来计算不同缓冲区内的斑块数量指数(NP), 其公式为:

$$NP = n \quad (8)$$

斑块数量指数能反映景观的空间格局, 经常被用来描述整个景观的异质性, 其值的大小与景观的破碎度有很好的正相关性^[27-29]。

表 3 各级道路特征及缓冲带宽度^[26]

Table 3 The features and buffer widths of different road grades ^[26]		
高速公路级别 Highway level	高速公路特征 Feature of highway	缓冲带宽度/m Width of buffer
高速公路 Freeway	四个或四个以上车道,中央有分割带,日交通量 25000 辆以上	1000
一级公路 First-class highway	连接重要政治经济文化中心的干线公路,日交通量 1000—25000 辆	500
二级公路 Secondary highway	连接政治、经济中心的干线公路,日交通量 2000—10000 辆	250
三级公路 Tertiary highway	沟通县或者县以上城市的支线公路,日交通量 2000—10000 辆	100

3 结果与分析

3.1 诸暨市整体土壤侵蚀总量及侵蚀等级情况

RUSLE 模型的各因子的分布结果见附图 1,将各因子相乘,得到诸暨市 1999 年和 2003 年的土壤

侵蚀模数。1999 年诸暨市的土壤侵蚀量模数在 0—380.02(t hm⁻² a⁻¹) 之间(分布见图 1),2003 年诸暨市的土壤侵蚀量模数在 0—572.94(t hm⁻² a⁻¹) 之间(图 2,图 3),其土壤侵蚀等级分布见表 4。对比表 4

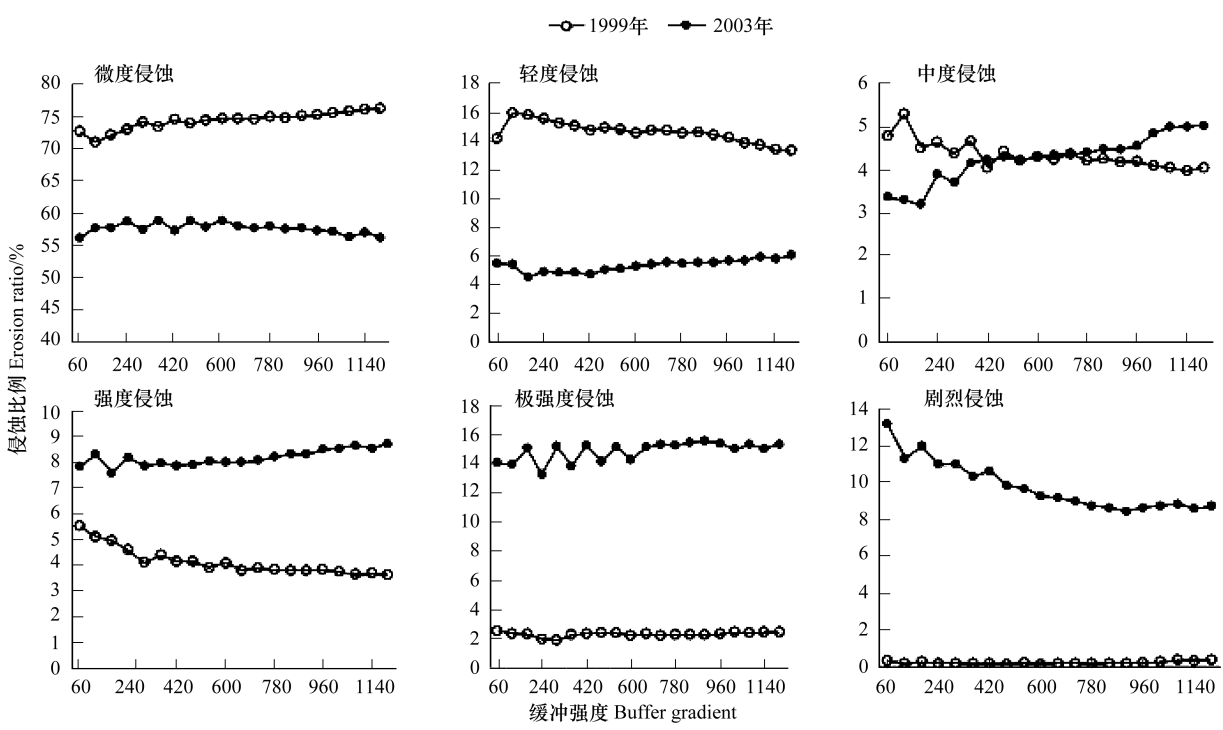


图 1 1999 和 2003 年高速公路缓冲梯度内土壤侵蚀等级对比

Fig.1 Comparison of soil erosion within highway buffer gradient in 1999 and 2003

表 4 1999 年和 2003 年诸暨市土壤侵蚀等级分布表^[25]

Table 4 Soil erosion grade distribution of 1999 and 2003, Zhuji City			
侵蚀类别 Erosion type	侵蚀模数/(t hm ⁻² a ⁻¹) Erosion modulus	1999 年比例/% Ratio of 1999	2003 年比例/% Ratio of 2003
微度侵蚀 Slightly erosion	<10	78.05	37.68
轻度侵蚀 Mild erosion	10—25	13.45	8.93
中度侵蚀 Moderate erosion	25—50	4.54	8.72
强度侵蚀 Erosion intensity	50—100	2.29	14.10
极强度侵蚀 Extremely erosion	100—200	1.40	21.59
剧烈侵蚀 Severe erosion	>200	0.27	8.98

中 1999 年和 2003 年的土壤侵蚀等级比例可知,对微度侵蚀和轻度侵蚀而言,2003 年的侵蚀面积低于 1999 年,而对中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀而言,2003 年的侵蚀面积大于 1999 年,总体而言,2003 年诸暨市的土壤侵蚀程度加剧,受土壤侵蚀危害影响的地区增加。

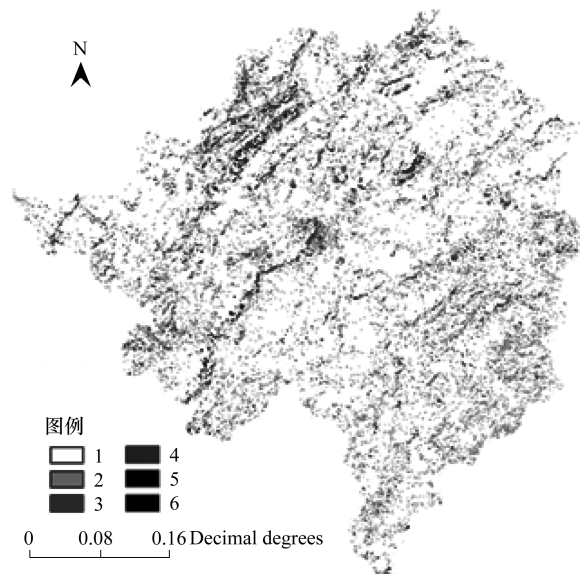


图 2 1999 年土壤侵蚀量分布图
Fig.2 Distribution of soil erosion in 1999

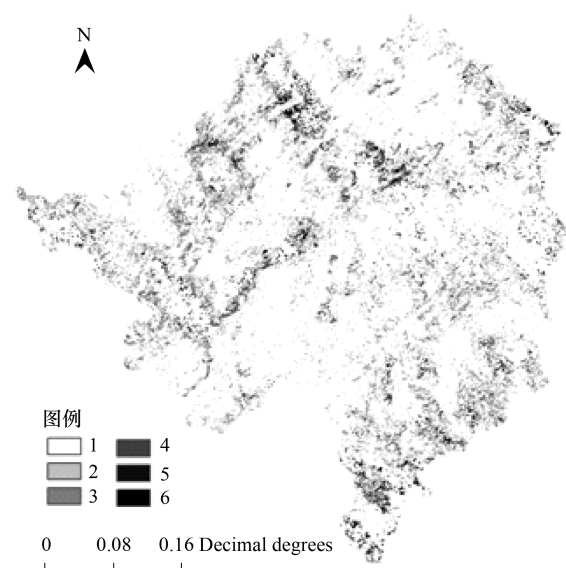


图 3 2003 年土壤侵蚀量分布图
Fig.3 Distribution of soil erosion in 2003

3.2 高速公路对土壤侵蚀的影响

通过高速公路缓冲区分析,分别得到 1999 年和 2003 年高速公路缓冲梯度内的土壤侵蚀分布情况(图 1,数据见表 5、表 6):

图 1 显示:1999 年微度侵蚀等级的面积占比均高于 2003 年,比例在 70% 以上,但在 2003 年,微度

表 5 1999 年诸暨市高速公路土壤侵蚀缓冲区分析结果
Table 5 erosion within highway buffer gradient in 1999, Zhuji

缓冲距离 Buffer distance	侵蚀等级 Erosion level/%					
	<10	10—25	25—50	50—100	100—200	>200
60	72.65	14.21	4.80	5.51	2.49	0.36
120	71.07	16.02	5.31	5.11	2.30	0.20
180	72.09	15.87	4.52	4.94	2.30	0.28
240	73.01	15.58	4.65	4.60	1.95	0.21
300	74.12	15.31	4.39	4.09	1.88	0.21
360	73.42	15.11	4.68	4.39	2.23	0.18
420	74.47	14.81	4.06	4.15	2.32	0.19
480	73.95	14.97	4.44	4.14	2.34	0.16
540	74.46	14.82	4.22	3.90	2.35	0.24
600	74.63	14.61	4.32	4.08	2.19	0.18
660	74.67	14.78	4.25	3.80	2.28	0.22
720	74.60	14.75	4.38	3.88	2.19	0.20
780	74.98	14.59	4.22	3.82	2.21	0.19
840	74.85	14.66	4.27	3.79	2.21	0.22
900	75.09	14.47	4.19	3.80	2.23	0.21
960	75.21	14.27	4.20	3.81	2.29	0.24
1020	75.56	13.89	4.10	3.75	2.40	0.29
1080	75.79	13.78	4.05	3.64	2.36	0.38
1140	76.12	13.43	3.99	3.68	2.42	0.36
1200	76.18	13.35	4.06	3.62	2.40	0.39

表 6 2003 年诸暨市高速公路土壤侵蚀缓冲区分析结果
Table 6 Soil erosion within highway buffer gradient in 2003, Zhuji

缓冲距离 Buffer distance	侵蚀等级 Erosion level/%					
	<10	10—25	25—50	50—100	100—200	>200
60	56.13	5.51	3.37	7.82	14.03	13.14
120	57.76	5.41	3.30	8.31	13.91	11.31
180	57.72	4.52	3.20	7.58	15.02	11.96
240	58.74	4.91	3.91	8.19	13.26	10.99
300	57.48	4.82	3.71	7.85	15.14	11.00
360	58.88	4.86	4.17	7.95	13.81	10.32
420	57.33	4.71	4.25	7.87	15.25	10.60
480	58.78	5.06	4.30	7.90	14.13	9.83
540	57.86	5.09	4.22	8.03	15.11	9.68
600	58.85	5.31	4.32	7.98	14.26	9.28
660	58.01	5.41	4.35	7.99	15.08	9.15
720	57.69	5.57	4.38	8.05	15.32	8.99
780	57.95	5.51	4.41	8.19	15.20	8.74
840	57.58	5.54	4.49	8.30	15.45	8.64
900	57.66	5.55	4.48	8.32	15.54	8.45
960	57.31	5.65	4.56	8.49	15.37	8.63
1020	57.19	5.70	4.87	8.53	14.98	8.73
1080	56.28	5.94	5.01	8.65	15.29	8.83
1140	57.04	5.82	5.01	8.53	15.00	8.60
1200	56.19	6.05	5.04	8.72	15.29	8.71

侵蚀等级的占比仅有 57%。1999 年轻度侵蚀等级的面积占比也高于 2003 年,比例约为 14%,随着缓冲距离增加,其占比呈现小幅降低,而 2003 年的轻度侵蚀等级占比仅有 5%左右。1999 年中度侵蚀等级的占比随缓冲距离增加而降低,从 5%下降至 4%,而 2003 年则刚好相反,从 3%上升至 5%。在 210m 至 510m 的缓冲区内,两者占比基本相同。2003 年强度侵蚀等级的面积占比均高于 1999 年,比例在 8%以上,而 1999 年的强度侵蚀等级占比却从 5.5%下降至 3.5%,且下降趋势明显。2003 年极强度侵蚀等级的占比远高于 1999 年,比例均稳定在 14%以上,而 1999 年的极强度侵蚀等级占比却仅维持在 2%附近。2003 年剧烈侵蚀等级的面积占比也远高于 1999 年,随着缓冲距离增加,比例从 14%降低至 8.5%,而 1999 年的剧烈侵蚀等级占比却仅维持在 0.2%至 0.3%之间(图 1)。

由上述结果可知:在缓冲梯度内,1999 年的土壤侵蚀风险大部分仅是轻微程度,中强度及以上的土壤侵蚀风险极低;2003 年的土壤侵蚀风险则不同,

轻微程度的风险比例有则所下降,中强度的侵蚀风险升高,而极强甚至剧烈强度的侵蚀等级的比例大大增加,超过了中强度的侵蚀等级。

各侵蚀等级的年际间差异与缓冲梯度的相关性分析结果见表 7。相关性分析的结果显示:高速公路建设前后,各侵蚀等级的年际差异与高速公路缓冲区之间均存在极显著的相关性($P<0.001$),这表明高速公路建设对高速公路缓冲区内的土壤侵蚀确实造成影响,增加了极强度侵蚀等级和剧烈侵蚀等级的比例,也增加了中度和强度侵蚀等级的比例,且随着缓冲距离增加,中度侵蚀、强度侵蚀和极强度侵蚀等级的年际差异随之增加(相关系数为正),而剧烈侵蚀等级的年际间差异随着缓冲距离增加而减少。这说明高速公路虽强烈导致剧烈程度的土壤侵蚀增加,但此效应的影响范围比其他侵蚀等级小。

为了进一步分析高速公路对土壤侵蚀的影响,将 2003 年各侵蚀等级的缓冲区分析情况作图,结果如图 4 所示。

表 7 高速公路缓冲梯度与土壤侵蚀等级的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of highway buffer and soil erosion

侵蚀等级 Erosion level	微度侵蚀 Slightly erosion	轻度侵蚀 Mild erosion	中度侵蚀 Moderate erosion	强度侵蚀 Erosion intensity	极强度侵蚀 Extremely erosion	剧烈侵蚀 Severe erosion
相关系数 Correlation coefficient	-0.863 **	0.847 **	0.930 **	0.949 **	0.581 **	-0.926 **
P	9.65×10^{-7}	2.41×10^{-6}	2.88×10^{-9}	1.72×10^{-10}	0.0072	4.70×10^{-9}

* * 表示极显著相关

图 4 显示:2003 年微度侵蚀的比例均在 55% 以上,在 660m 的范围内,其比例波动较为剧烈,此后呈现缓慢下降的趋势。2003 年轻度侵蚀和轻度侵蚀均表现出先下降后上升的情况,在 180m 范围内剧烈下降,而后随着距离增大不断上升。2003 年强度侵蚀在 300m 范围内呈现上下波动的情况,此后随着距离增加不断上升。2003 年极强度侵蚀在 660m 范围内呈现剧烈波动的情况,此后基本稳定在 15.2%。

2003 年剧烈侵蚀随着缓冲距离增加不断降低,在 660m 范围内下降迅速,此后基本维持在 8.6% (图 4)。由上述结果可知:高速公路对剧烈等级的土壤侵蚀影响最大,且此影响具有距离效应,距离高速公路越近,土壤侵蚀的变化幅度就越大,波动就越剧烈,此后变化逐渐变缓,趋于稳定,其中 660m 是高速公路对土壤侵蚀影响范围。

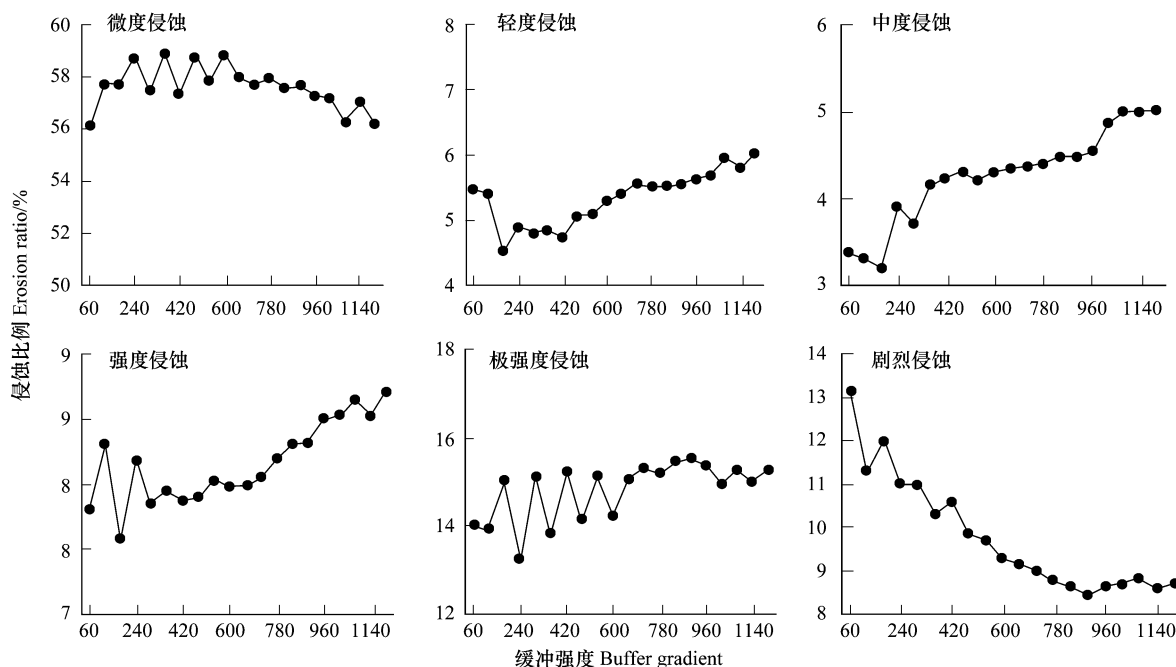


图 4 2003 年各侵蚀等级的缓冲区分析

Fig.4 Buffer analysis of the different erosion levels in 2003

3.3 高速公路土壤侵蚀与景观破碎化关系

为验证高速公路土壤侵蚀与景观破碎化的关系,首先对高速公路的缓冲区进行景观破碎化的定量化表述,并与土壤侵蚀等级进行相关性分析。在众多的景观格局指数中,斑块数量指数常被用来描述整个景观的异质性,其值的大小与景观的破碎度呈显著正相关性^[27-29]。因此本研究选用斑块数量指数来衡量景观破碎化程度(表 8),并对斑块数量的

年际间变化与各侵蚀等级的年际间差异进行相关性分析(表 9)。结果显示:2003 年缓冲梯度内的斑块数量明显高于 1999 年,这表明 2003 年高速公路边际区域的景观破碎化程度比 1999 年有较大幅度增加,而相关性分析更加证实景观破碎化程度与土壤侵蚀间有显著的关联,尤其对剧烈侵蚀等级而言,其侵蚀风险的加剧与景观破碎化程度加深之间是极显著的正相关。以上结果均证实公路建设加重景观破

碎化程度,并由此引发更严重的土壤侵蚀风险。

表 8 1999 年和 2003 年缓冲梯度内的斑块数量
Table 8 The number of patches in the 1999 and 2003 within the buffer gradient

缓冲梯度/m Buffer gradient	60	120	180	240	300	360	420	480	540	660
1999 年斑块数量/个 Patch number in 1999	411	548	698	817	943	1086	1237	1377	1511	1806
2003 年斑块数量/个 Patch number in 2003	597	857	1179	1450	1705	2004	2273	2515	2779	3305
缓冲梯度/m Buffer gradient	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200	
1999 年斑块数量/个 Patch number in 1999	1921	2076	2197	2343	2486	2835	2951	3085	3198	
2003 年斑块数量/个 Patch number in 2003	3550	3794	4053	4309	4542	5259	5576	5834	6097	

3.4 高速公路土壤侵蚀与建设用地比例增加的关系
伴随城市化进程推进,建设用地比例逐渐增加,各类厂房、商业建筑及居民区不断涌现,城镇化已经成为不可避免的趋势。通过对缓冲区内土壤侵蚀与

建设用地进行相关性分析,证实两者之间存在显著的关联(表 10),建设用地增加加剧了土壤侵蚀风险,尤其是导致剧烈程度的土壤侵蚀增加。

表 9 土壤侵蚀等级与景观破碎化的相关性分析
Table 9 Correlation analysis of soil erosion and landscape fragmentation

侵蚀等级 Erosion level	微度侵蚀 Slightly erosion	轻度侵蚀 Mild erosion	中度侵蚀 Moderate erosion	强度侵蚀 Erosion intensity	极强度侵蚀 Extremely erosion	剧烈侵蚀 Severe erosion)
相关系数 Correlation coefficient	-0.996 **	-0.982 **	0.910 **	0.995 **	0.996 **	0.999 **
P	6.81×10 ⁻²⁰	1.38×10 ⁻¹⁴	2.63×10 ⁻⁸	1.57×10 ⁻¹⁹	1.04×10 ⁻²⁰	1.38×10 ⁻²⁴

* * 表示极显著相关

表 10 土壤侵蚀等级与建设用地比例的相关性分析
Table 10 Correlation analysis of soil erosion and construction land

侵蚀等级 Erosion level	微度侵蚀 Slightly erosion	轻度侵蚀 Mild erosion	中度侵蚀 Moderate erosion	强度侵蚀 Erosion intensity	极强度侵蚀 Extremely erosion	剧烈侵蚀 Severe erosion
相关系数 Correlation coefficient	-0.991 **	-0.968 **	0.914 **	0.994 **	0.991 **	0.983 **
P	3.15×10 ⁻¹⁷	2.68×10 ⁻¹²	1.82×10 ⁻⁸	7.22×10 ⁻¹⁹	2.89×10 ⁻¹⁷	1.31×10 ⁻¹⁴

* * 表示极显著相关

4 讨论

4.1 高速公路的切割作用加剧土壤侵蚀

由结果 3 可知,景观破碎化是加剧高速公路土壤侵蚀的重要原因,而景观破碎化的形成则是由于高速公路的强烈切割作用。有研究表明,道路的线性切割作用会改变局部的景观格局,改变斑块形状、面积和多样性,加剧景观的破碎化程度^[30]。由此可

见,以高速公路为代表的人为活动通过改变局部景观格局,继而增加了土壤侵蚀风险。此外,高速公路的切割作用还改变了雨水、径流以及泥沙的输送途径,影响区域的水文和泥沙输送过程,对于地区水文过程而言,造成不可逆转的改变。因此对于高速公路建成后对土壤侵蚀所造成后续影响需要引起足够的重视,以防范更大的侵蚀风险。

4.2 土地利用改变加剧土壤侵蚀

土壤侵蚀是土地利用变化引起的主要环境效应之一,是自然和人为因素相互作用和叠加的结果。由结果 4 可知,建设用地增加是加剧高速公路土壤侵蚀的另一个原因。建设用地的变化改变地表植被覆盖程度,影响土壤理化性质,改变了土壤环境条件,使水土保持的效应有明显差异^[31]。由高速公路建设引发的城市化进程加速,更加快了土地利用方式的改变,如高速公路边界的某些区域,新的工业、商业和居民区建筑大量涌现。高速公路带来的交通便利刺激这些区域由农村向城镇发展,间接加剧土壤侵蚀风险。高速公路建设还改变了人类对高速公路边界的土地利用方式。如耕地景观在近高速公路处往往被整治成比较规整的形状,辅以水渠进行分隔,这些被规整为块状的耕地加剧了景观的破碎化程度,成为潜在的土壤侵蚀来源,若加之不合理的耕地管理方式,耕地内部就容易出现荒地单元,引发土壤侵蚀^[32]。而对高速公路建设本身而言,就是对土地利用类型的不可逆的改变,原本可用于涵养水源的农田、植被都被水泥覆盖,变成不透水面,增加瞬时暴雨对高速公路周边土壤的冲刷能力,还加快了降雨之后径流的形成速度,增加了径流量,加剧土壤侵蚀的风险。

4.3 对高速公路水土保持工作中的建议

由于高速公路土壤侵蚀的作用范围不仅限于高速公路本身,故在高速公路规划之初便要对高速公路的影响范围进行有效且合理的定量化预测,以便选择合理的建设区域,避开易发生土壤侵蚀的路段和具有潜在侵蚀危害的区域。本研究的结果表明,就诸暨市的高速公路而言,其对剧烈侵蚀等级的影响范围集中在 660m,因此高速公路建设规划和水土保持措施地制定均要从这个范围出发综合考虑,从减少景观破碎化和合理规划建设用地比例来指导高速公路规划和土地利用格局的改造工作,尽可能减少由于高速公路建设带来的土壤侵蚀风险,减少在已建高速公路的水土治理工作中的低效益投入。

5 结论

(1) 根据 RUSLE 模型的计算结果,杭金衢高速公路建成后,诸暨市整体的土壤侵蚀量和侵蚀严重程度均高于建成前。而高速公路缓冲区分析和相

关性分析的结果也证实,高速公路与土壤侵蚀加剧之间存在极为显著的关系。缓冲区分析的年际间对比结果表明高速公路的建设增加了高速公路土壤侵蚀量,其中剧烈侵蚀等级的响应更为强烈,而高速公路单侧 660m 的范围则是剧烈侵蚀的影响范围,因此也是对高速公路土壤侵蚀的防治重点区域。

(2) 通过验证高速公路土壤侵蚀与景观破碎化及建设用地的关系,揭示出高速公路土壤侵蚀的成因,由公路建设导致的景观破碎化加剧和建设用地比例增加,都是引起剧烈侵蚀增加的原因,因此高速公路的水土保持需要重点从这两方面入手,采取相应措施。

References:

- [1] Da Z X, Wang S S, Fang T Z. Soil conservation research status at home and abroad. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2009, 29(2): 24-26.
- [2] Wang Y Q, Li W. Analysis of causes of soil erosion and control measures. *Jilin Water Resources*, 2011, (4): 52-55.
- [3] Wang L X, Zhu J Z. *Soil and Water Conservation*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007.
- [4] Liu Z. *Soil and Water Conservation Monitoring Technology*. Beijing: China Land Press, 2004.
- [5] Yao X Z, Zhu Q H. Initial study on the soil erosion & soil conservation in the expressway construction of China. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2010, 22(2): 128-134.
- [6] Xiao T, Hu K Z. A dissertation on the advices with regard to the losses of water and soil and protection in the highway construction. *Communications Science and Technology Heilongjiang*, 2009, 32(11): 70-71.
- [7] Yu D Y, Wang Z J. Causes and measures of soil erosion in road construction. *Inner Mongolia Water Resources*, 2006, (4): 55-56.
- [8] Batra P C. Comparison of ipomoea and grass for checking erosion on road embankments. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1968, 16(3): 152-155.
- [9] Turner A K, Schuster R L. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington DC: National Academy Press, 1996.
- [10] Luce C H, Black T A. Sediment production from forest roads in western Oregon. *Water Resources Research*, 1999, 35(8): 2561-2570.
- [11] Jones J A, Swanson F J, Wemple B C, Snyder K U. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 76-85.
- [12] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, Clevenger A P, Cutshall C D, Dale V H, Fahrig L, France R L, Goldman C R, Heanue K, Jones J, Swanson F, Turrentine T, Winter T C. *Road Ecology: Science and Solutions*. Washington US: Island Press, 2003.
- [13] Chen Y H, Pan W B, Cai Y B. Assessment of soil erosion sensitivity in watershed based on RUSLE - A case study of Jixi

- Watershed. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(4): 490-496.
- [14] Chen Y M, Liu G B, Zhen F L, Zhang W. Proceeding and application on soil erosion model of RUSLE. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 80-83.
- [15] Yoder D, Lown J. The future of RUSLE: Inside the new Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50(5): 484-489.
- [16] Guo X B, Wang Z Q, Zhang R L. Study on temporal distribution of rainfall erosivity and daily rainfall erosivity model in red soil area of Zhejiang. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(3): 35-37, 128-128.
- [17] Liu B Y, Zhang K L, Jiao J J. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model. *Journal of Natural Resources*, 1999, 4(4): 345-350.
- [18] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall-Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning. Washington DC: USDA, Science and Education Administration, 1978.
- [19] McCool D K, Brown L C, Foster G R, Mutchler C K, Meyer L D. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [20] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Trans of the American Society of Agricultural Engineers*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [21] Cai C F, Ding S W, Shi Z H, Huang L, Zhang G Y. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [22] Zhou B, Yang B L, Hong Y T, He Y P. Study on quantitative remote sensing monitoring of soil erosion in Karst areas based on Gis-aseamplified by Anshun City, Guizhou. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000, 20(1): 13-21.
- [23] Wang W Z, Jiao J J. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(5): 1-20.
- [24] Tan J X, Wang Z L. Study on Conghuasoil erosion volume prediction with GIS and RUSLE. *Pearl River*, 2011, 32(2): 37-41.
- [25] Pan J H, Dong X F. GIS-and-QuickBird-Based quantitative assessment of soil erosion in small watershed. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(2): 1-5.
- [26] Li S C, Xu Y Q, Zhou Q F. Statistical analysis on the relationship between road network and ecosystem fragmentation in China. *Progress in Geography*, 2004, 23(5): 77-85.
- [27] Wu J G. *Landscape Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2001: 99-109.
- [28] Yang G J, Xiao D N. Forest landscape pattern and fragmentation: a case study on Xishui Natural Reserve in Qilian mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(5): 56-61.
- [29] Wang Y J, Li C S, Liu K, Su J W, Cheng S Y. Landscape patterns and fragmentation in Yulinprefecture. *Resources Science*, 2005, 27(2): 161-166.
- [30] Pan J H, Liu C Y, Qin X J, Zhang W Q. Changes of soil erosion landscape pattern in loess hilly regions-a case study of loess plateau Qingcheng project area. *Journal of Huaihai Institute of Technology: Natural Sciences Edition*, 2007, 16(2): 62-65.
- [31] Yao Y. Study on Risk Pattern of Water Loss and Soil Erosion based on RUSLE and MCR-a Case Study of Diebu County, Gansu Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [32] Wang T W. The Study of Road Network Characteristics and Its Ecological Impact in Yellow River Delta [D]. Wuhan: Central China Agricultural University, 2008.

参考文献:

- [1] 宣志祥, 汪绍盛, 方天纵. 国内外水土保持研究现状. *亚热带水土保持*, 2009, 29(2): 24-26.
- [2] 王耀强, 李巍. 水土流失成因分析及治理措施. *吉林水利*, 2011, (4): 52-55.
- [3] 王礼先, 朱金兆. *水土保持学*. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [4] 刘震. *水土保持监测技术*. 北京: 中国大地出版社, 2004.
- [5] 姚兴柱, 朱启红. 国内高速公路建设中的水土流失和水土保持初探. *亚热带水土保持*, 2010, 22(2): 128-134.
- [6] 肖田, 胡开智. 浅谈道路建设中关于水土流失防护的建议. *黑龙江交通科技*, 2009, 32(11): 70-71.
- [7] 于定一, 王志军. 公路建设的水土流失成因形式及防治对策. *内蒙古水利*, 2006, (4): 55-56.
- [13] 陈燕红, 潘文斌, 蔡莞缤. 基于 RUSLE 的流域土壤侵蚀敏感性评价——以福建省吉溪流域为例. *山地学报*, 2007, 25(4): 490-496.
- [14] 陈云明, 刘国彬, 郑粉莉, 张卫. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 80-83.
- [16] 郭新波, 王兆骞, 张如良. 浙江红壤区降雨侵蚀力季节分布与日雨量模型研究. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 35-37, 128-128.
- [17] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用. *自然资源学报*, 1999, 4(4): 345-350.
- [21] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [22] 周斌, 杨柏林, 洪业汤, 何延波. 基于 GIS 的岩溶地区水土流失遥感定量监测研究-以贵州省(原)安顺市为例. *矿物学报*, 2000, 20(1): 13-21.
- [23] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. *水土保持通报*, 1996, 16(5): 1-20.
- [24] 覃杰香, 王兆礼. 基于 GIS 和 RUSLE 的从化市土壤侵蚀量预测研究. *人民珠江*, 2011, 32(2): 37-41.
- [25] 潘竞虎, 董晓峰. 基于 GIS 与 QuickBird 影像的小流域土壤侵蚀定量评价. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(2): 1-5.
- [26] 李双成, 许月卿, 周巧富. 中国道路网与生态系统破碎化关系统计分析. *地理科学进展*, 2004, 23(5): 77-85.
- [27] 邬建国. *景观生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2001: 99-109.
- [28] 杨国靖, 肖笃宁. 森林景观格局分析及破碎化评价——以祁连山西水自然保护区为例. *生态学杂志*, 2003, 22(5): 56-61.
- [29] 王永军, 李团胜, 刘康, 苏建文, 程水英. 榆林地区景观格局分析及其破碎化评价. *资源科学*, 2005, 27(2): 161-166.
- [30] 潘竞虎, 刘春雨, 秦晓娟, 张伟强. 土壤侵蚀景观格局变化分析——以世界银行水土保持庆城项目区为例. *淮海工学院学报: 自然科学版*, 2007, 16(2): 62-65.
- [31] 姚好. 基于 RUSLE 和最小累积阻力模型的水土流失格局分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [32] 王天巍. 黄河三角洲道路网络特征及其对生态影响的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.