

基于 N-SPECT 模型的胶东半岛土壤 侵蚀及泥沙入海通量研究

常远勇^{1,2}, 侯西勇², 于良巨², 毋亭^{2,3}

(1. 上海市气象科学研究所, 上海 200030; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 探讨土壤侵蚀与土地利用的关系, 为胶东半岛海岸带水环境保护和治理以及流域综合管理提供必要的技术支持和参考依据。[方法] 在 RS-GIS 技术支持下, 基于 N-SPECT 模型, 对胶东半岛 2006—2010 年土壤侵蚀量及泥沙入海通量进行模拟。[结果] 土壤侵蚀高值区集中于半岛东部和南部, 低值区主要分布于半岛中部和中南部。大沽河流域、五龙河流域和大沽夹河流域 3 大流域对整个胶东半岛的土壤侵蚀贡献最大。针对 3 大流域之外的其他半岛区域, 按照汇水区划分岸段, 各岸段单位长度泥沙入海通量的空间差异显著, 青岛市城阳区海岸、青岛南端(胶南)海岸、莱州湾东部海岸和威海西南端海岸泥沙通量最大。[结论] 土壤侵蚀和产沙与源区土地利用结构密切相关。总体而言, 耕地主导型区域是土壤侵蚀严重的区域, 而林地和草地具有减轻土壤侵蚀的作用。

关键词: 胶东半岛; 海岸带; 土壤侵蚀; 泥沙通量; 土地利用

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0187-06

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.035

A Study on Soil Erosion and Sediment Flux to Coastal Waters in Jiaodong Peninsula Based on N-SPECT Model

CHANG Yuanyong^{1,2}, HOU Xiyong², YU Liangju², WU Ting^{2,3}

(1. Shanghai Meteorological Science Research Institute, Shanghai 200030, China;

2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai,

Shandong 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] To study the relation between soil erosion and land use patterns, in order to provide useful information for coastal water environment protection and the integrated river basin management in Jiaodong peninsula. [Methods] Taking Jiaodong Peninsula as the case study area, we evaluated soil erosion and sediment flux into coastal waters by using N-SPECT model and RS and GIS techniques. [Results] The high loads of soil erosion were found in eastern and southern coastal areas in Jiaodong peninsula, while low loads were mainly distributed in the middle and central region of the study area. The three watersheds (Dagu, Wulong and Dagujia river) contributed most to the soil erosion and sediment transportation. The sediment flux to coastal waters through shorelines exhibited high complicated spatial patterns, coastal areas in Yangcheng District, Southern Qingdao (Jiaonan City), Eastern Laizhou bay and the southwest of Weihai City have the highest sediment flux. [Conclusion] Both soil erosion and sediment were closely related to watershed land use, generally, farmland dominated areas have the most severe soil erosion, while woodland and grassland could prevent soil erosion to a great extent.

Keywords: Jiaodong peninsula; coastal zone; soil erosion; sediment flux; land use.

土壤侵蚀不仅破坏土地资源, 引起土地生产力下降和土壤理化性质变劣, 而且加剧区域洪涝、干旱、滑坡、泥石流等灾害的发生; 土壤侵蚀对作物营养元素

循环和区域气候、植被、水文条件的变化有着重要的影响, 是陆地生态系统退化的主要影响因子, 也是制约经济社会持续、稳定、健康发展的重要因素^[1-2]。对

收稿日期: 2014-01-06

修回日期: 2014-03-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“胶东半岛土地利用变化对近岸海域陆源非点源污染的影响效应研究”(40801016); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-224); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05130703)

第一作者: 常远勇(1987—), 男(汉族), 河南省信阳市人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为城市气象、海岸带环境遥感。E-mail: yychang@yic.ac.cn.

通信作者: 侯西勇(1976—), 男(汉族), 山东省泰安市人, 博士, 研究员, 主要从事海岸带土地利用变化、海岸带综合管理研究。E-mail: xyhou@yic.ac.cn.

区域土壤侵蚀进行定量评估,分析土壤侵蚀时空变化特征,对于因地制宜采取有效措施保持水土,减轻和控制土壤侵蚀具有重要的意义。泥沙侵蚀、搬运和沉积是一个系统的地表过程。河流搬运泥沙堆积形成广袤的冲积平原和河口三角洲,然而,泥沙输运和沉积也会引起灾害和环境问题,例如,河道及湖泊淤积、近海水体富营养化等。国内外不少学者对泥沙入海通量进行了模拟研究,例如 Syvitski 等^[3]研究表明全球每年因土壤侵蚀增加河流泥沙,造成的输沙率是 $1.70 \times 10^9 \sim 2.80 \times 10^9$ t, Walling 等^[4]对泰国 Chao Phraya 河径流量和泥沙入海通量进行定量评估,以及对全球 147 条河流的水沙输运进行研究,发现近 50% 的河流输沙率有下降趋势;李国胜等^[5]用数值模拟的方法对黄河入海泥沙输运进行模拟研究;李希宁等^[6]根据面积增长率与河流输沙率的相关图得出黄河三角洲堆积—侵蚀转换的临界河流输沙率为 $2.45 \times 10^8 \sim 2.78 \times 10^8$ t/a; Zhang 等^[7]利用流量和输沙的拟合曲线得出珠江流域的输沙 1980 年左右达到最大值,1990 年后则急剧减少,指出 20 世纪 90 年代和 21 世纪初期由于人类活动的影响珠江的入海泥沙分别下降了 26.8 和 50.46 Mt/a。

N-SPECT(non-point source pollution and erosion comparison tool)模型是由美国 NOAA 海岸带服务中心于 2004 年开发的用于水文—水环境模拟的半分布式集总模型,该模型集成了分布式模型和集总模型的优点,在满足一定精度要求条件下,大大降低了模型参数准备及设定的复杂性,具有简单、可操作性强和精度较好等优点。N-SPECT 模型基于修正通用土壤侵蚀方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)对土壤侵蚀量进行模拟,RUSLE 模型是当今土壤侵蚀量定量模拟最普遍采用的模型,在国内外得到了广泛的研究和应用^[8]。目前,基于 N-SPECT 模型的相关研究主要集中在国外,如 Paris 等^[9]对中美洲区域河流和暗礁连通性进行的研究等。

胶东半岛是中国第一大半岛,区位优势、资源丰富,是中国重要的特色农业区和海洋经济区。改革开放以来,受气候、人文、经济活动等的影响,胶东半岛经济迅速发展,成为中国最具经济活力和竞争力的地区之一。但是,伴随着土地资源的高强度开发、农业集约化生产等,区域水土流失严重,土壤侵蚀造成的营养元素伴随泥沙等沉积物通过河流系统输送至近岸海域,对海岸带环境和生态造成极大的冲击。因此,本文以胶东半岛为案例区,应用 RS、GIS 技术,结合土壤侵蚀模型,对胶东半岛 2006—2010 年土壤侵蚀与泥沙入海通量进行模拟,分析土壤侵蚀空间格局

特征,探索土壤侵蚀与土地利用结构的关系。研究可为胶东半岛海岸带水环境保护和治理以及流域综合管理提供必要的技术支持和参考依据。

1 研究区介绍

胶东半岛是山东省胶莱河以东的区域,西北临渤海,东北和南部临黄海,西部与华北平原连接,是中国最大的半岛^[10]。胶东半岛属中朝准地台胶辽台隆,全区分为半岛北部侵蚀低山丘陵区、半岛中部侵蚀平原区、半岛北部滨海冲积平原区、胶莱河冲积平原区、半岛东部侵蚀低山丘陵区、蜡山侵蚀中低山丘陵区等地貌类型区,丘陵地貌广泛分布,面积占 60% 以上。属暖温带湿润季风气候,四季分明,1 月(最冷月)均温 $-3 \sim -1$ °C,8 月(最热月)均温约 25 °C,年降水量 650~850 mm,约 60% 的降水集中于夏季。地带性土壤为典型棕色森林土,多分布在缓坡地和排水良好的平地,主要是辟为农田和果园,低山丘陵中上部残积、坡积物上的粗骨棕壤土层浅薄、质地较粗,多种植花生、甘薯等作物。半岛中部由大泽山、艾山、昆嵛山、伟德山等构成一个西南东北向的天然分水岭,形成南北分流的不对称水系,界河、黄水河、大沽夹河、沁水河、辛安河等北流入渤、黄海;大沽河、五龙河、母猪河、乳山河等南流入黄海。大部分河流呈南北流向,河道弯曲、比降较大,雨季行洪期间水深流急,枯水季节水浅流缓甚至断流。

为便于研究,首先基于 SRTM—DEM 数据,借助 ArcGIS 9.3 软件中的流域分析功能,依据汇流量大小将胶东半岛划分为 3 个主要流域及 29 个小流域(对若干面积很小的流域进行了合并处理),进而,依据流域边界确定半岛的西部边界,所划定的胶东半岛的空间范围与传统意义差异不大,涵盖烟台和威海两市的全部、青岛市的大部以及潍坊市的局部,面积为 2.79×10^4 km²。

2 研究方法

2.1 土壤侵蚀模型

Wischmeier 等^[11]于 20 世纪 60 年代提出通用土壤侵蚀模型(USLE),经 Renard 等^[12]发展为修正通用土壤侵蚀模型(RUSLE),该模型形式简洁,是目前预测土壤侵蚀最为广泛使用的方法。该方程将影响土壤侵蚀的 6 个因子连乘,其定型模式为:

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

式中:A——土壤侵蚀量[t/(hm²·a)]; R——降雨和径流因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)]; K——土壤可蚀性因子[(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)];

L, S ——坡度坡长因子; C, P ——地表覆盖和水土保持措施因子。

N-SPECT 模型计算土壤侵蚀产沙量的关键是土壤侵蚀量的计算和泥沙输移比(sediment delivery ratio, SDR)的计算,二者相乘即得到对应的土壤侵蚀产沙量。模型基于 RUSLE 方程估算土壤侵蚀量,利用 Williams^[13]提出的方法计算泥沙输移如下:

$$SDR = 13.66 - 11 \cdot d_a - 0.1972 \cdot z_l \cdot CN \quad (2)$$

式中:SDR——泥沙输移比; d_a ——栅格像元面积; z_l ——基于 DEM 得到,其在数值上等于沿着水流方向,相邻像元的高程之差与相邻像元中心点距离之比; CN——SCS 曲线数,其确定分为 3 个步骤^[14]:

(1) 根据土壤水分的最小渗透率划分 4 组水文学土壤类型,以此来确定研究区土壤的水文学土壤组属性。

(2) 考虑土壤的前期湿度条件,参照 AMC III 级划分指标来客观定义土壤前期湿度。AMC III 级划分指标的具体内容如下:AMC I:土壤干旱,但未达到植物萎蔫点,有良好的耕作及耕种;AMC II:发生洪泛时的平均情况,即许多流域洪水发生前夕的土壤水分平均状况;AMC III:暴雨前的 5 d 内有大雨或小雨及低温出现,土壤水分几乎呈饱和状况。

(3) 综合研究区的土地利用类型、水文土壤组特征和土壤前期湿度条件,在美国农业部土壤保持局提出的 CN 表中查找并确定适用的 CN 值^[15]。本研究所得 CN 值如表 1 所示。

表 1 胶东半岛区域 SCS 曲线 CN 值

土地类型	不同土壤水文组对应的 CN 值			
	A	B	C	D
耕地	0.61	0.72	0.79	0.87
林地	0.31	0.52	0.65	0.75
草地	0.33	0.57	0.70	0.82
水域	0	0	0	0
城镇用地	0.89	0.92	0.84	0.95
居民点	0.59	0.74	0.82	0.86
交通工矿	0.81	0.88	0.91	0.93

2.2 模型参数计算方法

2.2.1 降雨可蚀性因子 降雨侵蚀力因子 R 值与降雨量、降雨强度、降雨历时、雨滴大小及下降速度有关,它反映了降雨对土壤的潜在侵蚀能力。本文利用杨娟等^[16]提出的利用多年平均降雨量和多年月平均降雨量计算降雨侵蚀力的经验如公式(3):

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{\left[(1.5 \times \lg \frac{p_i^2}{p}) - 0.8188 \right]} \quad (3)$$

式中: P_i ——每年的月降水量(mm); p ——每年的年降水总量(mm)。

胶东半岛气象台站数量有限,且空间分布不均匀,因此,降水信息选用 TRMM3B42 降水产品,该数据是 1998 年以来全球(180°W—180°E, 50°S—50°N)格点降水资料,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 $3 \text{ h}^{[17]}$ 。汇总胶东半岛 2006—2010 年各月和各年的降水量,用于计算该时段降雨可蚀性因子。

2.2.2 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性是指土壤遭受侵蚀的敏感程度,是土壤抵抗由降雨、径流产生的侵蚀能力的综合体现,也可表示土壤受侵蚀的潜在可能性。本研究采用 1990 年 Zhang 等^[18]在侵蚀—生产力影响评价模型(EPIC)中发展形成的土壤可蚀性因子 K 值计算公式:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp\{-0.0256 S_{an}(1 - S_{il}/100)\} / [S_{il}/(C_{cl} + S_{il})]^{0.3} \times \{1 - 0.25C/[C + \exp(3.72 - 2.95C)]\} \times \{1 - 0.75SN_1/[SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9 \times SN_1)]\} \quad (4)$$

式中: S_{an} ——砂粒含量(%); S_{il} ——粉砂含量(%); C_{cl} ——黏粒含量(%); C ——有机碳含量(%); $SN_1 = 1 - S_{an}/100$ 。其中,砂粒(0.1~2 mm),粉砂(0.002~0.1 mm),黏粒(<0.002 mm)。

土壤信息来自于《山东土壤》,是全省第二次土壤调查的汇编成果,统计胶东半岛土壤采样点的粒径、质地、有机质含量等信息,通过土壤级配^[19]得到各土壤粒径百分比含量,进而对采样点 K 值进行空间插值得到胶东半岛 K 值空间分布。

2.2.3 坡度坡长因子 坡度、坡长因子(L, S 因子)反映地形地貌对土壤侵蚀的影响,可基于数字高程模型(DEM)提取。本文选用 Aster Gdem 数据,该数据是基于美国航天局(NASA)新一代对地观测卫星 TERRA 的观测结果制作完成,数据覆盖北纬 83° 到南纬 83° 之间的所有陆地区域,空间分辨率 $30 \text{ m}^{[20]}$ 。根据 Renard 等^[12]提出的方法计算 L, S 因子,如公式(5—7):

$$L = (\lambda/72.6)^m \quad (5)$$

$$S = 10.8 \times \sin\theta + 0.03 \quad (\theta < 9^\circ) \quad (6)$$

$$S = 16.8 \times \sin\theta - 0.50 \quad (\theta > 9^\circ) \quad (7)$$

式中: L, S ——坡长、坡度; λ ——坡长; θ ——坡度角; m ——待定参数。与地形有关,可查阅模型技术手册确定。

2.2.4 地表覆盖和水土保持因子 N-SPECT 模型中,地表覆盖和水土保持因子(C, P 因子)由土地利用类型决定,根据不同的土地利用类型,通过查阅模型技术手册确定对应的 C, P 因子值。本文基于 2005 年的 Landsat ETM+ 影像信息解译得到土地利用数据,分为耕地、林地、草地、水体、城镇、村庄和交通工矿 7 个类型(如表 2 所示)。

表 2 流域土地利用类型及 CP 因子值

编号	Ⅱ级类型	重新分类和编码			CP 值				
		名称	编码	代码					
11	水田	耕地	1	AGRL	0.240				
12	旱地								
21	有林地	林地	2	FRST	0.004				
22	灌木林								
23	疏林地								
24	其他林地								
31	高覆盖度草地	草地	3	PAST	0.050				
32	中覆盖度草地								
33	低覆盖度草地								
61	沙地								
63	盐碱地								
65	裸土地	水域	4	WATR	0				
41	河渠								
42	湖泊								
43	水库坑塘								
44	永久性冰川雪地								
45	滩涂								
46	滩地								
47	海湾								
64	沼泽地	城镇用地	5	URAN	0				
51	城镇用地								
52	农村居民点					农村居民点	6	RURL	0.030
53	其他建设用地								
54	交通运输	交通工矿	7	INDL	0.001				

3 结果与分析

3.1 胶东半岛土壤侵蚀量分析

3.1.1 土壤侵蚀量空间格局 在像元尺度计算胶东半岛 2006—2010 年土壤侵蚀模数,如附图 8 所示。可见,土壤侵蚀模数空间差异显著、格局复杂,总体来看,高值区主要分布于半岛东部,低值区主要分布于半岛中部和中南部,胶州湾北部和东部区域形成一个明显的环状低值区;对照各年份土地利用状况,发现高值区土地利用类型多为耕地,中部低值区土地利用类型多为林地和草地,中南部区域土地利用类型虽为耕地,但是地势平坦,坡面水流能量较小,不易产生土壤侵蚀。

3.1.2 不同流域土壤侵蚀量 附图 9a 展示了 2006—2010 年不同流域的年平均土壤侵蚀量,32 个流域中,大沽河流域(流域 1)、五龙河流域(流域 2)和大沽夹河流域(流域 3)的土壤侵蚀贡献量最大,3 个流域土壤侵蚀量占整个胶东半岛土壤侵蚀量的比例分别达 15.9%,10.7%和 8.0%。统计不同流域单位面积输出负荷,如附图 9b,数值最高的是西乳山口(流域 17),最低的是桃园河流域(流域 27),单位面积输出负荷高的流域多位于胶东半岛东部沿海和胶州

湾南部区域,低值区大都位于半岛北部环渤海周边,大沽河流域作为胶东半岛最大的流域,其单位面积土壤侵蚀负荷也相对较小。

3.2 泥沙入海通量分析

3.2.1 胶东半岛泥沙入海通量 胶东半岛内陆腹地较小,降水和径流的季节性显著,夏季多暴雨洪水,较短时间内径流和泥沙即可入海。对于 29 个较小的流域,暴雨过程中大量泥沙伴随坡面漫流经过岸线排入海中,而对于大沽河、五龙河、大沽夹河 3 个主要的流域,泥沙则通过 3 个河流入海口直接排入海中,造成严重的水环境问题。因此,针对 32 个流域,分别统计其年平均泥沙入海通量(图 1),在此基础上,针对 29 个较小的流域,计算单位长度岸线的泥沙通量,并分等级(表 3),用于分析内陆土壤侵蚀所导致的海岸带水体环境风险特征(图 2)。

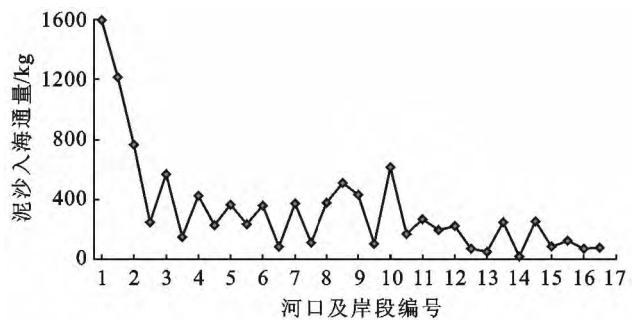


图 1 河口及岸段泥沙入海通量

注:河口及岸段编号分别代表:1.大沽河河口;2.大沽夹河河口;3.东莱州湾;4.庙岛海峡;5.金山港;6.鸡鸣岛;7.桑沟湾;8.靖海湾;9.浪暖口;10.西乳山口;11.北丁字湾;12.大桥湾;13.东胶州湾;14.西北胶州湾;15.灵山湾;16.利根湾;17.琅琊(台湾)。下同。

表 3 泥沙通量分级与对应的水体环境风险级别

通量级别	泥沙通量/ ($10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	风险级别
I 级	<1 000	低风险
II 级	1 000~3 000	中等风险
III 级	3 000~8 000	较高风险
IV 级	$\geq 8 000$	高风险

注:I 级指低通量;II 级指中等通量;III 级指较高通量;IV 级指高通量。

平均每年分别约有 1 590,1 220 和 770 kg 的泥沙通过大沽河、五龙河、大沽夹河河口排入近岸海域;29 个岸段泥沙年入海通量差异较大,胶东半岛东南部岸段泥沙入海通量最高,如岸段 16,17,19 等,泥沙年入海通量都在 400 kg 以上,半岛南部岸段年泥沙入海通量最小,如岸段 29,31,32,泥沙年入海通量都在 90 kg 以下。

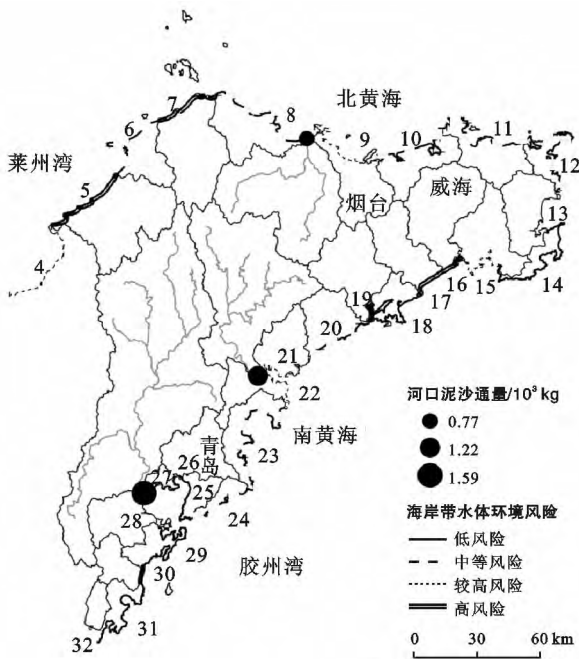


图 2 土壤侵蚀所导致的海岸带水体环境风险特征

各岸段泥沙通量差异明显,高通量岸段主要是城市化过程突出的青岛城阳区海岸、农业活动密集的青岛最南端(胶南市)海岸、莱州湾东部海岸以及威海西南端海岸,这些岸段的泥沙通量及其对水环境的压力大,琅琊台湾和胶州湾东北部岸段(岸段 32 和 26)单位长度泥沙通量最高,水环境风险最突出;较高通量岸段空间分布较为分散,如岸段 4,13,22,水环境风

险较为突出;中等通量岸段主要位于半岛北部海岸和青岛市东北部海岸;低通量岸段则主要分布于胶东半岛东部(威海段)和东南部(青岛段)岸段,如岸段 12,14,29,其泥沙入海对水环境影响较小。

3.2.2 泥沙入海通量与源区土地利用结构的关系

为了进一步探讨胶东半岛泥沙入海通量与源区土地利用结构的关系,统计每个通量级别岸段对应源区的土地利用结构(图 3),总体而言,各个通量级别对应源区的土地利用结构差异较大。其中,Ⅳ,Ⅲ,Ⅱ级别源区的耕地比重突出,林、草地比例较小,居民地和工矿用地极少,例如,Ⅳ级流域中耕地比重普遍大于 60%,居民地和工矿用地则均在 10%以下。Ⅰ级源区土地利用结构呈现两大类型,一类是居民地—交通工矿主导型,如岸段 25,27 对应源区的居民地和交通工矿用地超过 50%,耕地和林草地面积比例较小;另一类是耕地优势不明显,但林、草地比例较高的区域,如岸段 12,29,31 等对应源区的林、草地比例在 30%左右。Ⅳ与Ⅲ级别源区土地利用结构中,耕地都占很大比例,这些区域受人工耕作等影响,土壤松软,在雨水、径流的带动下,很容易发生土壤侵蚀,造成泥沙输移;Ⅱ级源区虽然耕地也占较大的比例,然而林草地、交通工矿用地也有较高的比例,减轻了土壤侵蚀强度;Ⅰ级源区中居民地、交通工矿、林草地广泛分布,大大减轻了土壤侵蚀强度,泥沙产量较少,对近岸水体的影响较小。

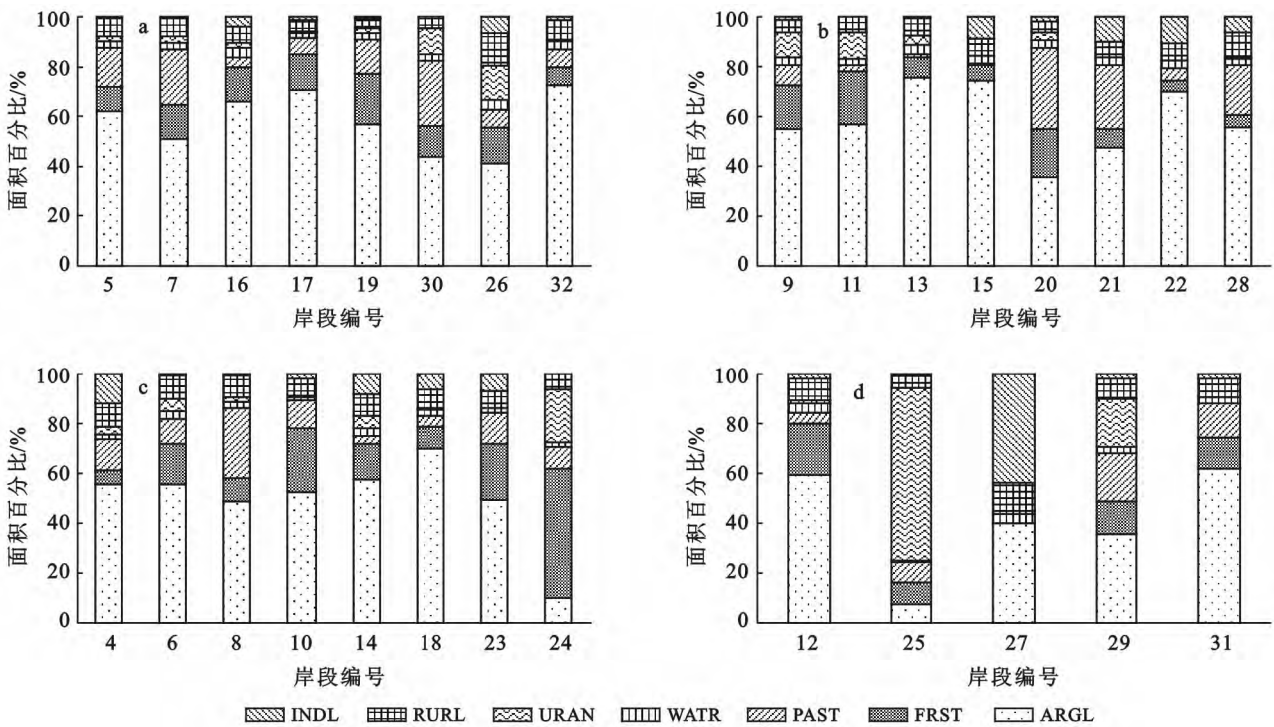


图 3 各通量级别岸段源区土地利用结构

4 结论

(1) 土壤侵蚀高值区集中于半岛东部和南部,低值区主要分布于半岛中部和中南部,大沽河流域、五龙河流域、大沽夹河流域对整个胶东半岛区域土壤侵蚀量的贡献最大;单位面积土壤侵蚀输出负荷高的流域主要分布于半岛东部沿海和胶州湾南部区域,低值区大都位于环渤海区域。

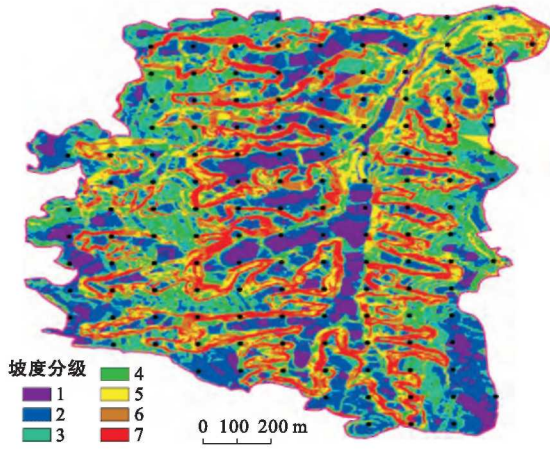
(2) 各岸段单位长度泥沙通量差异明显,高通量岸段主要位于城市化突出的青岛城阳区海岸、农业活动密集的青岛最南端海岸、莱州湾东部以及威海西南部海岸,对沿岸水环境影响较大,胶东半岛东北部(威海段)和东南部(青岛段)单位长度岸段泥沙通量最小,对沿岸水环境压力最小。

(3) 土壤侵蚀强度与土地利用结构密切相关,各通量级别对应源区土地利用结构差异显著,总体而言,耕地主导型区域是土壤侵蚀的关键源区,而林地和草地具有减轻土壤侵蚀和泥沙入海通量的作用。

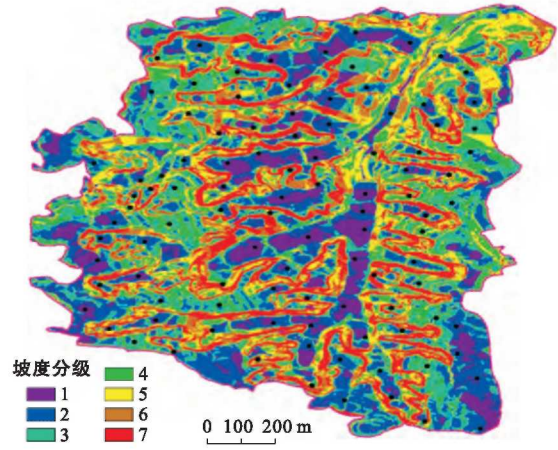
基于通用土壤侵蚀模型模拟土壤侵蚀和泥沙通量是一种行之有效的研究方法,尤其适合于实测数据缺失或严重不足区域的研究。本文基于 GIS 技术将胶东半岛划分为 32 个流域单元,并对其土壤侵蚀以及河口和岸段的泥沙通量进行模拟,受水库泥沙沉积数据缺失等因素影响,对部分流域泥沙通量的评估尚存在一定的偏差,尽管如此,从土壤侵蚀和泥沙源区空间格局、河口和海岸带水环境风险等级与格局等角度出发,本文研究仍具有很强的指导意义和现势性特征,能够为胶东半岛海岸带水环境的保护与治理以及流域综合管理和海岸带综合管理的结合提供有效的技术支持和参考依据。

[参 考 文 献]

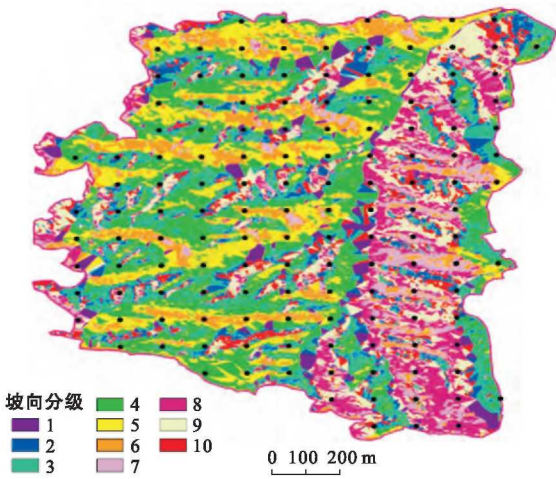
- [1] 赵善伦,尹民,张伟. GIS 支持下的山东省土壤侵蚀空间特征分析[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 694-699.
- [2] 许峰,郭索彦,张增祥. 20 世纪末中国土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 139-146.
- [3] Syvitski J P M, Vorosmarty C J, Kettner A J, et al. Impacts of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. Science, 2005, 308(5720): 376-380.
- [4] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world river [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1/2): 111-126.
- [5] 李国胜,王海龙,董超. 黄河入海泥沙输运及沉积过程的数值模拟[J]. 地理学报, 2005, 60(5): 707-716.
- [6] 李希宁,刘曙光,李从先. 黄河三角洲冲淤平衡的来沙量临界值分析[J]. 人民黄河, 2001, 23(3): 20-23.
- [7] Zhang Wei, Wei Xiaoyan, Zheng Jinhai, et al. Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves [J]. Continental Shelf Research, 2012, 38: 35-46.
- [8] 彭建,李丹丹,张玉清. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析: 以云南省丽江县为例[J]. 山地学报, 2007, 25(5): 548-556.
- [9] Paris C B, Cherubin L M. River-reef connectivity in the Meso-American Region [J]. Coral Reefs, 2008, 27(4): 773-781.
- [10] 刘亚龙,王庆,毕景芝,等. 基于 Mann—Kendall 方法的胶东半岛海岸带归一化植被指数趋势分析[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 79-87.
- [11] 董磊,彭明春,王崇云,等. 基于 USLE 和 GIS/RS 的滇池流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 11-15.
- [12] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M] // Agriculture Handbook NO. 703. Washington D. C: United States Government Printing Office, 1997.
- [13] Williams J R. Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models [M]. Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters. IAHS-AISH Pub, 1997, 122: 168-179.
- [14] U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Hydrology [M] // SCS National Engineering Handbook: Section 4. U. S. Gov. Print. Office: Washington D C, 1972.
- [15] 罗利芳,张科利,符素华. 径流曲线法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 58-61.
- [16] 杨娟,葛剑平,李庆斌. 基于 GIS 和 USLE 的卧龙地区小流域土壤侵蚀预报[J]. 清华大学学报, 2006, 46(9): 1526-1529.
- [17] Zhu Qiang, Chen Xiuwan, Fan Qixiang, et al. A new procedure to estimate the rainfall erosivity factor based on Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(9): 2437-2445.
- [18] Zhang Keli, Shu Anping, Xu Xianli, et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(6): 1002-1011.
- [19] 陆亚秋,刘庄,李杨. 太湖山丘区典型小流域 AnnAGNPS 模型数据库建立研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 22-25.
- [20] 马士彬,安裕伦. 基于 ASTER GDEM 数据喀斯特区域地貌类型划分与分析[J]. 地理科学, 2012, 32(3): 368-373.



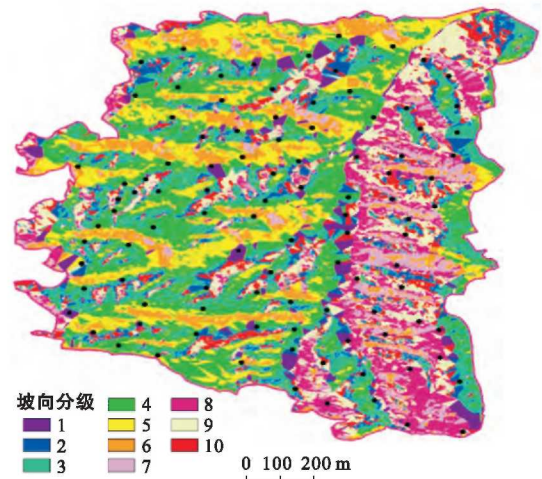
附图1 三眼井流域坡度与规则网格采样点叠加图(184页)



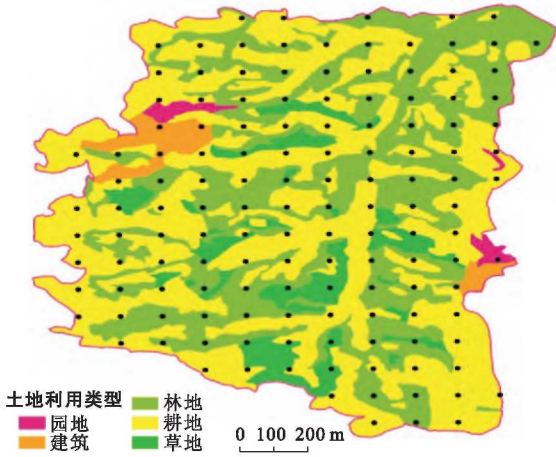
附图2 三眼井流域坡度与实际采样点叠加图(184页)



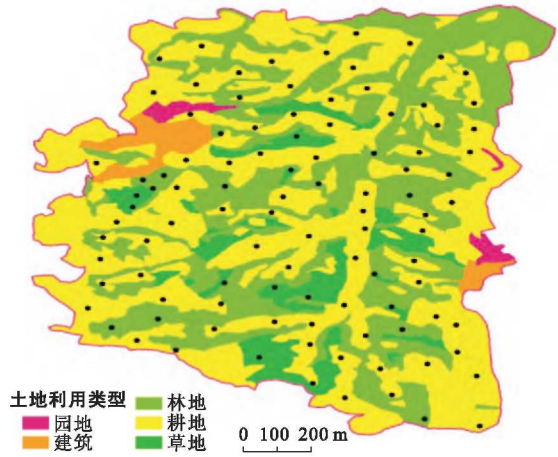
附图3 三眼井流域坡向与规则网格采样点叠加图(184页)



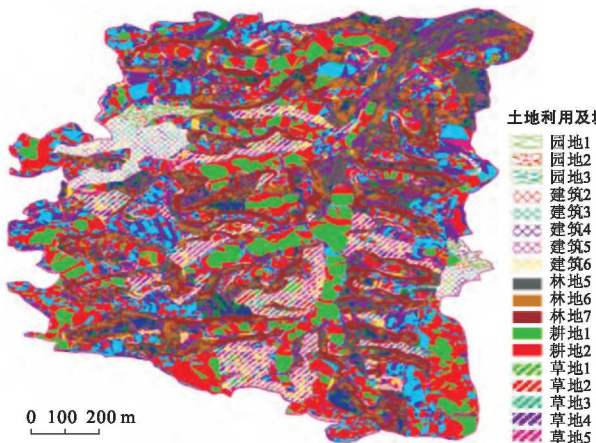
附图4 三眼井流域坡向与实际采样点叠加图(184页)



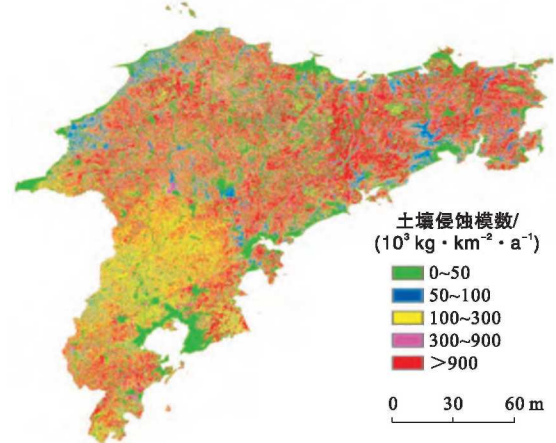
附图5 三眼井流域土地利用与规则网格采样点叠加图(184页)



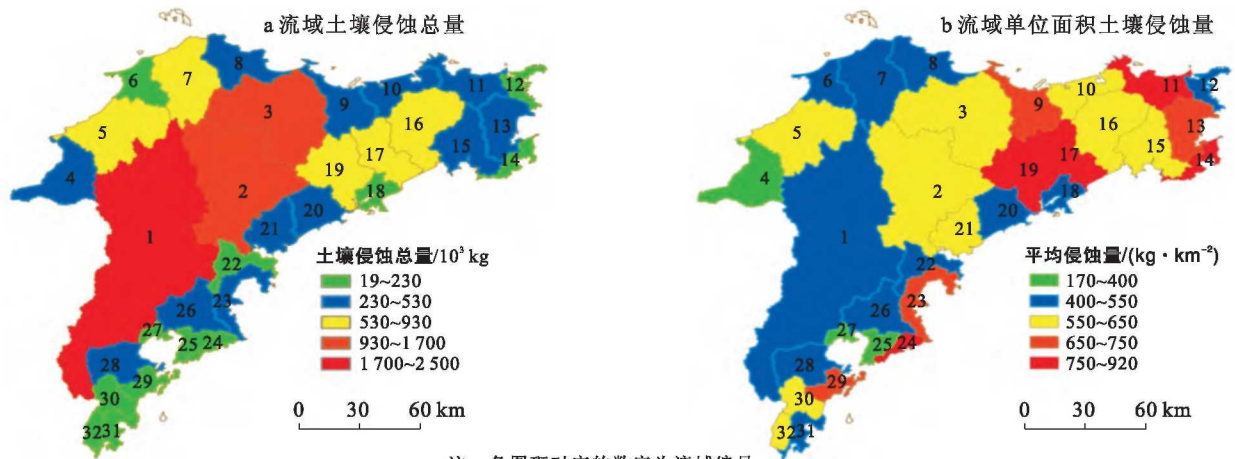
附图6 三眼井流域土地利用与实际采样点叠加图(184页)



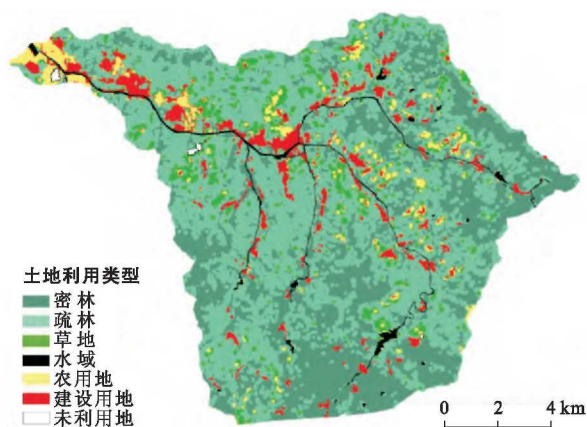
附图7 三眼井流域基于坡度分级的土地利用类型图(185页)



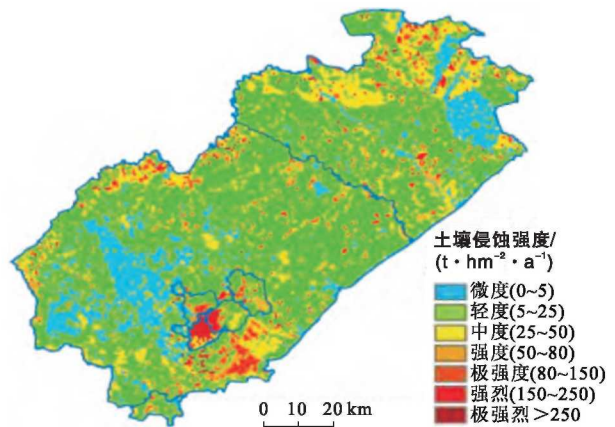
附图8 1998—2010年胶东半岛土壤侵蚀量均值空间分布(190页)



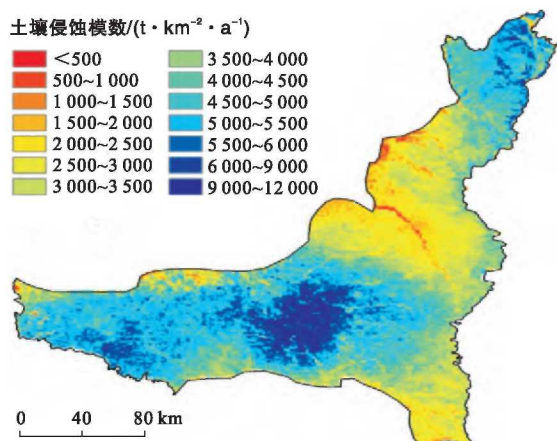
附图9 胶东半岛不同流域土壤侵蚀量空间分布(190页)



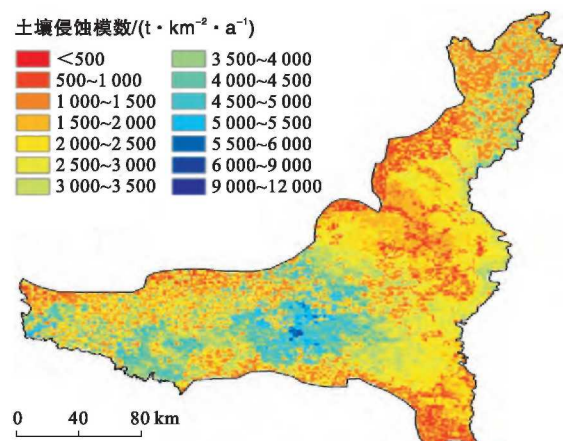
附图10 山东省济南市锦阳川流域土地利用类型(195页)



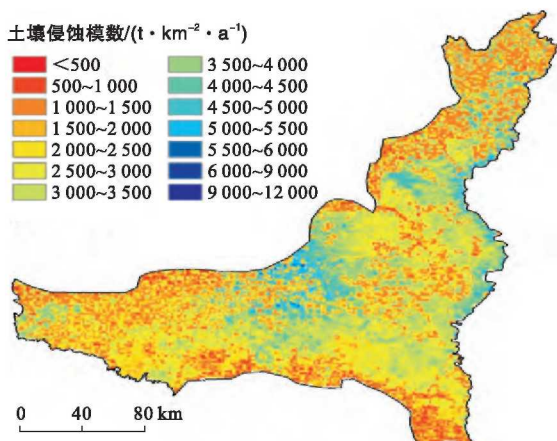
附图11 辽宁省阜新市土壤侵蚀强度分级(202页)



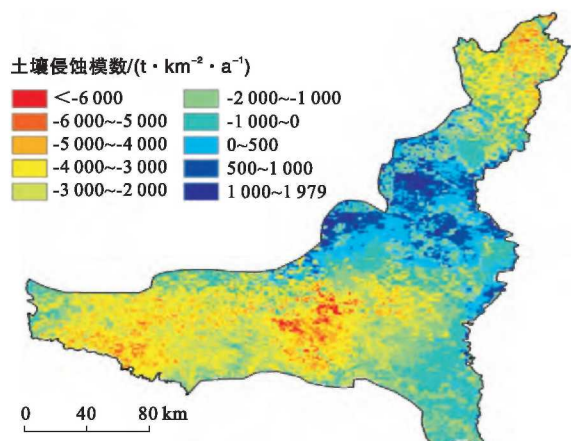
附图12 2000年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图13 2007年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图14 2012年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图15 2000—2012年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数差值示意图(222页)