

# 基于无人机遥感的 江苏省河道边坡水土流失要素调查

郭红丽<sup>1</sup>,代梦梦<sup>2,3</sup>,童建<sup>1</sup>,梁音<sup>2</sup>,李盟<sup>1</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局,江苏南京 210029;

2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室,江苏南京 210008;

3. 中国科学院大学现代农业科学学院,北京 100049)

**摘要:**基于野外实地调查资料和无人机航拍影像,提取了江苏省典型河道的边坡特征,并基于分析结果对全省各等级河道不同利用类型下的边坡面积进行了统计。结果表明:(1)调查河段4类河流边坡平均宽度分别为23.29,9.64,8.53和6.10 m,对应的平均坡度分别为19.11°,18.02°,23.07°和25.97°,边坡宽度和坡度随水面宽度分别表现出线性增大和减小的趋势;(2)边坡利用类型主要有草地、林地、耕地、裸地、护坡工程用地和其他6种,流域性河道(I)边坡草地和林地占比达81.62%,但也存在7.72%的护坡工程用地,区域性骨干河道(II)、其他重要河道(III)和县乡河道(IV)草地和林地面积占比在61.03%~75.61%之间,但均存在较大面积的耕地和裸地;(3)江苏省河道边坡总面积约1 638.54 km<sup>2</sup>,其中4类河道边坡占比分别为9.95%,6.47%,16.96%和66.62%,说明边坡主要存在于县乡河道和其他重要河道2种类型中,需要在实际的管理中重点关注。

**关键词:**河道边坡;利用类型;无人机影像;水土流失;江苏平原

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2022)04-0005-0006

## Investigation on soil erosion factors of river slope in Jiangsu Province based on UAV remote sensing

GUO Hongli<sup>1</sup>, DAI Mengmeng<sup>2,3</sup>, TONG Jian<sup>1</sup>, LIANG Yin<sup>2</sup>, LI Meng<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 21008, China; 3. College of Advanced Agricultural Sciences, University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the field survey data and unmanned aerial vehicle (UAV) aerial images, the slope characteristics of typical river channels in Jiangsu Province were extracted, and based on the analysis results, the slope areas under different utilization types of rivers of various grades in the province were counted. The results are as follows: 1) The average slope widths of the four rivers in the investigated reach were 23.29m, 9.64 m, 8.53 m and 6.10 m, respectively, and the corresponding average slopes were 19.11°, 18.02°, 23.07° and 25.97°, respectively. The slope width and slope show a linear increase and decrease trend with the water surface width, respectively. 2) Slope utilization types mainly included grassland, woodland, cultivated land, bare land, slope protection land

收稿日期:2021-09-07

基金项目:江苏省水利科技项目(2019039、2020051)

作者简介:郭红丽(1975—),女,高级工程师,工程硕士,主要从事水土保持监测、信息化监管、信息系统运行管理工作。

E-mail:626408148@qq.com

通信作者:梁音(1963—),男,研究员,博士,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持生态恢复研究。E-mail:

yliang@issas.ac.cn

and others. The proportion of grassland and woodland on the slope of regional channel ( II ) reached 81.62%, but there were 7.72% of slope protection land. The proportion of grassland and woodland on the regional backbone river channel ( II ), other important river courses ( III ) and township river courses ( IV ) was between 61.03 % and 75.61 %, but there were large areas of cultivated land and bare land. 3) The total area of river slope in Jiangsu Province was about 1638.54 km<sup>2</sup>, and the proportion of four types of river slope was 9.95%, 6.47%, 16.96% and 66.62%, respectively. It showed that the slope mainly exists in the township river courses ( IV ) and other important river courses ( III ), which needs to be focused on in the actual management.

**Key words:** river side slope; utilization type; UAV aerial image; water and soil loss; Jiangsu plain

江苏省水土流失主要分布在丘陵山区和平原沙土区<sup>[1]</sup>,以往研究多集中于低山、丘陵、岗地等区域,平原区水土流失问题尚未得到足够的重视。但江苏平原地区不仅存在水土流失现象,而且在降水量大、植被覆盖度低,人为活动干扰强烈的区域也有发生<sup>[2-3]</sup>。平原区河道边坡是水土流失的主要场所,河道边坡坡度大,土壤质地多为粉砂土,且由于当地的农业习惯常受到人类活动的干扰,容易导致河道边坡土壤侵蚀的发生<sup>[4-5]</sup>。坡面侵蚀产生的泥沙直接进入河道并淤积下来,引起河道堵塞,影响河道正常的引排水功能和防洪安全,给当地人们生产生活带来巨大危害。

目前河道边坡水土流失的研究大多是以点状形式开展的机理研究<sup>[6-7]</sup>,缺少区域范围内河道边坡水土流失整体情况的调查研究。由于河道边坡宽度较窄,基于水土流失动态监测目前使用地形图的空间分辨率,无法准确获取河道边坡的坡度因子,因此监测结果也难以反映出平原区河道边坡水土流失的真实情况。坡度、坡长<sup>[8]</sup>和土地利用方式<sup>[9]</sup>是影响边坡水土流失的主要因素。边坡利用方式可以通过改变土壤理化性质<sup>[10-12]</sup>,影响坡面侵蚀的产流产沙过程<sup>[13-14]</sup>,研究表明受人为了干扰频繁的耕地和缺少植被覆盖的裸地更容易发生严重的水土流失<sup>[15]</sup>。因此,边坡利用调查是了解区域范围内河道边坡水土流失整体情况的有效手段。遥感技术是目前土地利用调查研究中常用的技术手段<sup>[16-17]</sup>,但传统遥感卫星影像无法满足河道边坡利用类型解译要求。无人机遥感具有空间分辨率高,操作灵活、成本低等优点,能快速、准确获取地面信息,是目前最先进的地面反演技术之一<sup>[18-19]</sup>。本研究结合野外实地考察,采用无人机对江苏省典型河道边坡宽度和坡度特征以及边坡利用情况进行调查,以期全省河道边坡水土流失治理提供基础数据和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江苏省位于我国东部沿海,总面积为10.72万km<sup>2</sup>,地形以平原为主,主要由黄淮平原、江淮平原、滨海平原及长江三角洲平原组成,地面高程大部分在5~10 m,占全区总面积的69%。境内河网密布,水系发达,现有各类河道2万条之多,总长度高达11.11万km。研究区地处亚热带向暖温带的过渡区,气候温和,多年平均气温在13~16℃之间,多年平均降水量为800~1100 mm,但季节分布不均,其中70%的降水量集中在5—9月份。平原区土壤质地多为粉壤土,粉粒和砂粒含量高,黏塑性差。因此,在具有一定坡度条件的地方,尤其是裸露的河道边坡容易引发较严重的水土流失。

### 1.2 调查方法

本研究进行河道边坡调查的路线为:根据江苏省河流水系特征(级别、长度等)选择代表性河道,对选择的河道进行实地考察,记录实地调查河道的边坡特征(宽度、坡度),同时利用无人机航拍河段,根据实地考察资料解译航拍影像,提取河道边坡特征(面积、平均宽度)并进行边坡利用分类,计算边坡利用类型占比,基于江苏省河道资料上推全省河道边坡面积和各利用类型面积,获得全省河道边坡特征基础数据。具体路线见图1。

#### 1.2.1 调查河段布设

根据《江苏省骨干河道名录》<sup>[20]</sup>,江苏省现有流域性河道( I )0.35万km,区域性骨干河道( II )0.55万km,其他重要河道( III )1.25万km,县乡河道( IV )8.96万km,河道总长度11.11万km。本研究依据全省河流水系分布情况,同时考虑南北差异,分别选取了4个等级的共14条河道进行野外实地考察和无人机航拍,其中流域性河道( I )3条、区域性骨干河道( II )3条、其他重要河道( III )3条、县乡河

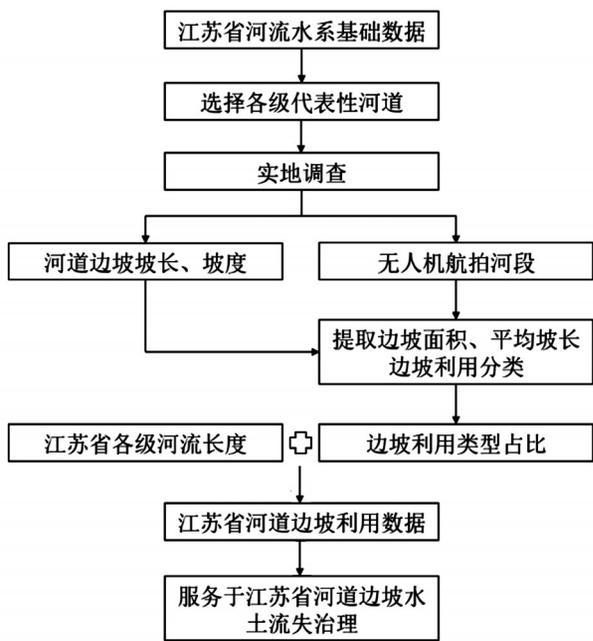


图1 江苏省河道边坡利用类型调查流程

道(Ⅳ)5条,每条河道设置3个河段,共计42条河段。调查河段分布如图2所示。

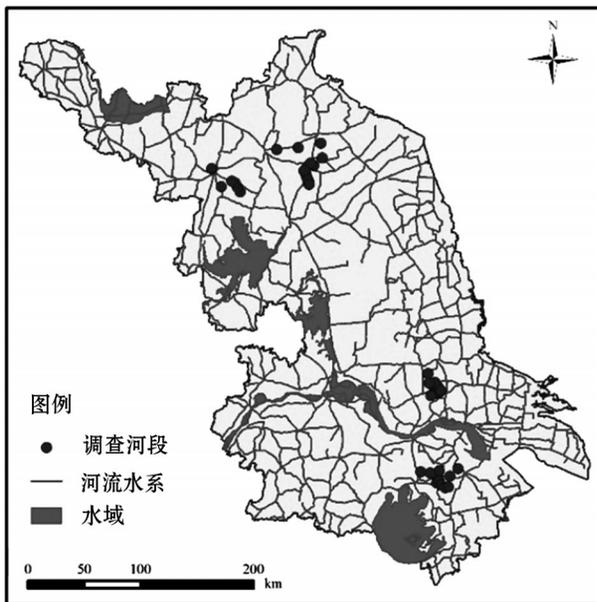


图2 调查河段空间位置

1.2.2 野外调查

本研究开展野外实地调查的时间为2021年4月13—23日,调查内容主要包括2个部分:(1)河道边坡基本情况;(2)无人机河段航拍。

在选择河段利用皮尺测定边坡宽度,即河流水位以上至边坡顶端的长度;利用坡度仪测定边坡

坡度,同时记录该河段边坡利用类型。此外,利用大疆精灵4 RTK四旋翼无人机对河道及边坡进行航拍。起飞前观察周围环境状况,选择无遮挡的宽阔、平坦地面作为起降平台。航拍前使用遥控器进行航线规划,每条河段的飞行航线一般不超过4条,大致顺河流方向飞行,无人机镜头垂直向下,同时设置飞行高度为80 m,航向重叠度和侧向重叠度分别为80%和70%,各条河段航拍长度约600 m。航拍结束后利用Pix4dmapper软件对无人机影像进行拼接处理,共计获得42条河段的正射影像图。

1.2.3 边坡利用类型划分

依据野外实地调查的边坡宽度、边坡坡度以及边坡利用方式等基础资料,在河段的正射影像图上识别并提取河道边坡。综合野外调查边坡利用特征,将河道边坡利用类型划分为草地、林地、耕地、裸地、护坡工程用地和其他用地6种。根据无人机影像的形状、颜色、纹理等特征,使用ArcGIS软件,采用目视解译的方式对各边坡利用类型进行解译和勾绘,统计各利用类型的边坡面积和占比。

1.2.4 数据获取

在ArcGIS平台中,采用测量工具和统计分析工具对无人机遥感影像中各河段的水面宽度、边坡面积(双侧)和边坡宽度(单侧)进行提取。水面宽度利用河段上、中和下部的宽度求平均获得,计算公式为

$$K_w = \frac{1}{3} \times (K_1 + K_2 + K_3) \quad (1)$$

式中: $K_w$ 为河段水面宽度,m; $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 分别为河段正射影像图上、中、下3个位置的水面宽度,m。

在影像处理的过程中,河道边坡面积较好识别和勾绘,除以河段长度即可获得该河段边坡平均坡长,与直接在ArcGIS中测量边坡坡长相比具有较高的准确性。因此,河段边坡平均宽度计算公式为

$$K_p = \frac{M}{2 \times L} \quad (2)$$

式中: $K_p$ 为边坡宽度(单侧),m; $M$ 为该河段双侧的边坡面积, $m^2$ ,通过勾绘无人机影像图中河道边坡范围获得; $L$ 为河段长度,本文中为600 m。

对调查的4个级别河道42条河段不同边坡利用类型进行统计,获得各河段边坡各类利用类型的面积。对同级别河道下所有河段相同边坡利用类型相加,可获得该级别河道在调查长度内边坡各利用类型的总面积,根据边坡总面积,可计算获得该级别河道边坡各利用类型面积占比,计算公式为

$$P_{ij} = \frac{M_{ij}}{M_i} \quad (3)$$

式中： $P_{ij}$ 为调查的*i*级河道中*j*类边坡利用类型面积占比； $M_{ij}$ 为调查的*i*级河道中*j*类边坡利用类型的面积； $M_i$ 为调查的*i*级河道边坡总面积， $m^2$ 。其中*i*为河道级别，本研究中为 I~IV 级，*j*为边坡利用类型数量，本研究中共有 6 种。

由于调查的河道涵盖了省内所有的河道级别，同时考虑了空间分布的差异，所以可认为所选择调查的河道情况可代表全省河道边坡特征。根据全省各级别河道长度结合公式(3)中确定的各级别河道中各类边坡利用类型占比，即可获得全省各级河道边坡各利用类型的面积，计算公式为

$$S_{ij} = \frac{M_i}{L_i} \times P_{ij} \times B_i \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中： $S_{ij}$ 为全省第*i*等级河道*j*种边坡利用类型的面积， $km^2$ ； $L_i$ 为第*i*等级河道航拍总长度， $m$ ； $B_i$ 为全省第*i*等级河道的总长度， $km$ 。

### 1.3 统计分析

利用 Excel 软件统计各等级河道边坡宽度、坡度的均值、最大值、最小值及变异系数等，利用 SPSS 软件对变量平均值进行方差分析(ANOVA)及相关性分析(Pearson)，利用 Origin 软件对边坡宽度、边坡坡度随河流宽度的变化趋势进行拟合和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 典型河道边坡特征

表 1 展示了 42 个调查河段河道的基本特征。4 类河道水面平均宽度分别为 141.51 m、66.35 m、30.61 m 和 16.01 m，在  $p < 0.01$  的水平上流域性河道(I)与其余 3 个等级河道存在显著差异，区域性骨

干河道(II)与其他重要河道(III)和县乡河道(IV)存在显著差异。流域性河道(I)、区域性骨干河道(II)和其他重要河道(III)的水面平均宽度分别是县乡河道(IV)的 8.8、4.1 和 1.9 倍。

调查河段中边坡宽度在 0~47.75 m 之间，河段边坡宽度最小值为 0 m，这是由于原有的边坡结构被垂直护岸工程影响导致，其次是 3.15 m，出现在县乡河道(IV)，最大值 47.75 m，出现在流域性河道(I)。4 类河道边坡宽度均值分别为 23.29 m、9.64 m、8.53 m 和 6.10 m，其中流域性河道(I)与其余 3 个等级河道具有显著性差异( $p < 0.01$ )。总体上，随着河道级别的降低，边坡宽度均值逐渐降低，二者关系用线性函数拟合具有较高的精度(图 4a)。4 类河道变异系数在 0.37~0.95 之间，表现为中等程度空间变异性，其中其他重要河道(III)和县乡河道(IV)边坡宽度变异系数为 0.41 和 0.37，为较弱的中等程度变异性，而流域性河道(I)和区域性骨干河道(II)边坡宽度变异系数为 0.75 和 0.95，为较强的中等变异性，这是因为部分 I、II 级河道受工程措施影响，使得边坡的形态与自然条件下相差较大，导致变异系数变大。

对边坡宽度大于 0 m 的调查河段的边坡坡度进行统计，结果显示边坡坡度在  $10^\circ \sim 38.03^\circ$  之间，河段边坡坡度最小值为  $10^\circ$ ，出现在流域性河道(I)，最大值  $38.03^\circ$ ，出现在县乡河道(IV)。4 类河道边坡坡度均值分别为  $19.11^\circ$ 、 $18.02^\circ$ 、 $23.07^\circ$  和  $25.97^\circ$ ，县乡河道(IV)与流域性河道(I)( $p < 0.05$ )和区域性骨干河道(II)( $p < 0.01$ )具有显著性差异。总体上，随着河道级别的降低，边坡坡度均值逐渐增大，二者关系用线性函数拟合  $\gamma^2$  为 0.53(图 4b)。4 类河道变异系数在 0.14~0.35 之间，表现为较弱的中等程度空间

表 1 各等级河道水面宽度、边坡宽度及坡度统计特征

河道等级	水面 平均宽度/ m	边坡宽度/m				边坡坡度/(°)			
		均值	最大值	最小值	变异系数	均值	最大值	最小值	变异系数
流域性河道 (I)	141.51A	23.29a	47.75	0	0.75	$19.11\beta\gamma^*$	31.50	10.00	0.35
区域性骨干河道 (II)	66.35B**	9.64b**	31.25	0	0.95	$18.02\beta\delta^{**}$	25.00	10.65	0.23
其他重要河道 (III)	30.61C**	8.53b**	14.76	4.53	0.41	$23.07\alpha\gamma\delta$	27.00	14.53	0.14
县乡河道(IV)	16.01C**	6.10b**	10.58	3.15	0.37	$25.97\alpha$	38.03	15.00	0.25

注：平均值后的字母表示差异显著性，同类字母间不同字母表示平均值具有显著性差异，\*和\*\*分别表示差异在  $p < 0.01$  和  $p < 0.05$  的水平上达到显著。

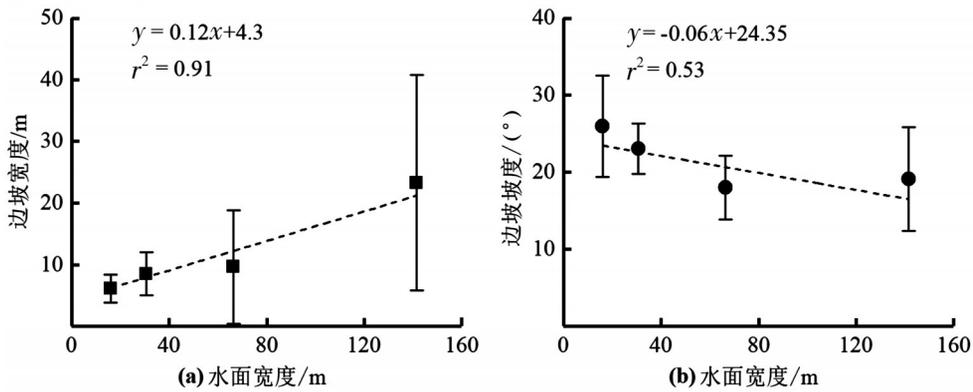


图4 边坡宽度(a)、边坡坡度(b)随水面宽度的变化趋势

变异性。

### 2.2 江苏省河道边坡利用分析

表2展示了42条调查河段不同利用类型下的边坡面积及占比。4类河道的边坡利用结构存在差异:流域性河道(I)以草地和林地为主,二者累计面积占比为81.62%,此外护坡工程用地面积占比高达7.72%,表明流域性河道(I)边坡的保护和治理程度高。其余3个等级河道边坡利用类型均以草地、林地和耕地为主,其中区域性骨干河道(II)的草地和林地累计面积占比较低,仅为61.03%,而耕地面积占比高达31.56%。其他重要河道(III)和县乡河道(IV)的草地、林地累计面积占比相近,分别为75.63%和71.70%,耕地面积占比分别为14.77%和21.84%,此外二者裸地面积占比较高,分别为8.55%和6.43%。由于缺少植被保护,裸露的边坡受到降雨侵蚀后容易发生严重的水土流失。

利用42条调查河道河段边坡面积的统计结果,可计算获得全省范围内各等级河道不同利用类型下的边坡面积(表3)。江苏全省的河道边坡总面积为1 638.54 km<sup>2</sup>,其中流域性河道(I)的边坡面积为

163 km<sup>2</sup>,占全省边坡面积的9.95%;区域性骨干河道(II)的边坡面积最小,为106.04 km<sup>2</sup>,仅占全省边坡面积的6.47%;其他重要河道(III)的边坡面积为277.88 km<sup>2</sup>,占全省边坡面积的16.96%;县乡河道(IV)的边坡面积最大,为1091.63 km<sup>2</sup>,占全省边坡面积的66.62%。以上数据表明,县乡河道(IV)边坡是全省河道边坡的主体。目前开展的农村生态河道整治工作已将其放在边坡水土流失治理的重要位置。江苏全省河道边坡各利用类型面积表现为草地>林地>耕地>裸地>护坡工程用地>其他用地,其中耕地和裸地是河道边坡水土流失高发区,且二者面积较大,分别为320.50 km<sup>2</sup>和99.82 km<sup>2</sup>,需对其进行重点治理。

### 3 结论

研究基于调查的4类河流42个河段的相关资料 and 无人机航拍影像,提取并分析了调查河段边坡的宽度、坡度以及边坡利用类型,并将边坡利用类型特征上推到全省范围,统计了全省不同级别河道边坡各利用类型的面积,主要结论如下:

表2 42条调查河段各边坡利用类型面积和占比

类型	流域性河道(I)		区域性骨干河道(II)		其他重要河道(III)		县乡河道(IV)	
	面积/m <sup>2</sup>	占比/%						
草地	94 831.14	37.71	29 355.04	28.20	46 873.42	39.05	42 723.90	38.96
林地	110 433.85	43.91	34 181.66	32.83	43 891.20	36.56	35 904.44	32.74
耕地	11 623.75	4.62	32 854.33	31.56	17 735.22	14.77	23 951.70	21.84
裸地	4 920.26	1.96	2 654.38	2.55	10 264.82	8.55	7 048.22	6.43
护坡工程用地	19 407.57	7.72	2 861.84	2.75	124.26	0.10	0.00	0.00
其他	10 265.39	4.08	2 207.09	2.12	1 153.81	0.96	21.78	0.02
合计	251 481.95	100	104 114.34	100	120 042.73	100	109 650.04	100

表3 江苏省各等级河道不同利用类型下的边坡面积

单位:km<sup>2</sup>

类型	流域性河道(Ⅰ)	区域性骨干河道(Ⅱ)	其他重要河道(Ⅲ)	县乡河道(Ⅳ)	总体
草地	61.46	29.90	108.50	425.34	625.21
林地	71.58	34.81	101.60	357.45	565.44
耕地	7.53	33.46	41.05	238.45	320.50
裸地	3.19	2.70	23.76	70.17	99.82
护坡工程用地	12.58	2.91	0.29	0.00	15.78
其他	6.65	2.25	2.67	0.22	11.79
合计	162.99	106.03	277.87	1 091.63	1 638.54

(1)调查河段4类河流边坡平均宽度分别为23.29, 9.64, 8.53和6.10 m,对应的平均坡度分别为19.11°, 18.02°, 23.07°和25.97°。边坡利用类型主要有草地、林地、耕地、裸地、护坡工程用地和其他6种,不同级别河道,各利用类型占比具有一定差异。

(2)江苏省河道边坡总面积约1 638.54 km<sup>2</sup>,其中其他重要河道(Ⅲ)和县乡河道(Ⅳ)边坡面积占比较大,分别为16.96%和66.62%。各边坡利用类型中,草地、林地和耕地占比较多,分别为38.16%, 34.15%和19.56%。其次为裸地,总面积达到99.82 km<sup>2</sup>,在河道边坡水土流失治理中需要重点关注。

(3)利用无人机遥感和代表河道上推方法可较为准确地获得全省河道边坡特征数据。研究可为江苏省河道边坡土壤侵蚀管理提供数据基础,同时可为类似河沟边坡调查研究提供方法支持。

#### 参考文献:

- [1] 吴颖超,王震,曹磊,等.基于GIS和PSR的江苏省水土流失易发区划分研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(4):690-696.
- [2] 贾立海.河北省平原水土流失成因及其防治措施[J].南水北调与水利科技,2011,9(5):158-160.
- [3] 谢志仁,肖彬,黄家柱,等.平原地区水土流失区划与评价模型试验——以江苏省为例[J].南京师大学报(自然科学版),2002(1):94-98.
- [4] 高之栋,柏继利,王运昌.平原沙土区水土流失及其防治措施探讨——从江苏省河道清淤及其效益分析[J].亚热带水土保持,2012,24(3):39-42.
- [5] 邹碧莹,丁美,籍春蕾,等.江苏省丘陵山区及平原沙土区水土流失综合治理及效益评估研究[J].水土保持通报,2012,32(1):156-160,180.
- [6] Darby S E, Rinaldi M, Dapporto S. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(F3).
- [7] Wolman M G. Factors influencing erosion of a cohesive river bank [J]. American Journal of Science, 1959, 257(3):204-216.
- [8] 王瑄,郭月峰,高云彪,等.坡度、坡长变化与水土流失量之相关性分析[J].中国农学通报,2007(9):611-614.
- [9] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等.南方红壤区不同利用土地产生流沙特征试验研究[J].农业工程学报,2012,28(2):239-243.
- [10] 邓瑞芬,王百群,刘普灵,等.黄土坡面不同土地利用方式对土壤有机碳流失的影响[J].水土保持研究,2011,18(5):104-107.
- [11] 韩姣姣,段旭,赵洋毅,等.干热河谷不同土地利用类型坡面土壤水分时空变异[J].水土保持学报,2017,31(2):129-136.
- [12] 刘旦旦,张鹏辉,王健,等.黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J].林业科学,2013,49(9):102-106.
- [13] 陈众,田丰,董俊.不同土地利用方式对丘陵山区坡面侵蚀产沙量的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(1):186-191.
- [14] 李桂芳,杨任翔,谢福倩,等.不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征[J].水土保持学报,2020,34(2):101-107,230.
- [15] 彭宏佳,吴起鑫,任斐鹏,等.喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应[J].农业环境科学学报,2018,37(4):756-765.
- [16] 厉彦玲,赵庚星.土地利用/覆盖变化与土壤质量退化遥感研究进展[J].遥感信息,2017,32(2):1-6.
- [17] 张成扬,赵智杰.近10年黄河三角洲土地利用/覆盖时空变化特征与驱动因素定量分析[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(1):151-158.
- [18] 冯家莉,刘凯,朱远辉,等.无人机遥感在红树林资源调查中的应用[J].热带地理,2015,35(1):35-42.
- [19] 廖小罕,周成虎,苏奋振,等.无人机遥感众创时代[J].地球信息科学学报,2016,18(11):1439-1447.
- [20] 江苏省水利厅,江苏省骨干河道名录[R].南京:江苏省水利厅,2010.