江苏省平原区河岸边坡利用方式和特征分析

代梦梦[1,2]，梁 音[1]，田芷源[1]，郭红丽[3]，杨逸辉[4]，李 盟[3]，郭 伟[5]，贺燕子[1,2]

(1.土壤与农业可持续发展国家重点实验室，中国科学院南京土壤研究所，南京 210008；
2.中国科学院大学现代农业科学学院，北京 100049；3.江苏省水文水资源勘测局，南京 210029；
4.江苏省水利厅农水处，南京 210029；5.江苏省水文水资源勘测局宿迁分局，江苏 宿迁 223800)

摘要：河岸边坡是平原区水土流失的主要策源地，土地利用方式是影响边坡水土流失的重要外在因素，对河岸边坡利用类型的调查研究可为区域范围内边坡水土流失治理提供基础数据。基于 42 条河段的无人机航拍影像和野外实地调查数据，统计了江苏省 4 类河道不同利用方式下的河岸边坡面积，并分析了沙土区、非沙土区，以及不同水土保持区划的边坡利用特征。结果表明：(1)研究区内河岸边坡利用类型主要包括草地、林地、耕地、裸地、护坡工程用地和其他用地 6 类，面积占比分别为 38.15%，34.45%，19.66%，6.10%，0.93%和 0.70%，耕地和裸地面积占比合计达 25.76%，表明河岸边坡受人为干扰强烈，存在严重的水土流失风险；(2)沙土区河岸边坡的林地、耕地和裸地面积占比分别比非沙土区高出 11.77%，5.62%和 4.43%，草地和护坡工程用地面积占比则分别低于非沙土区 21.00%和 0.63%，表明沙土区河岸边坡发生水土流失的潜在风险更大；(3)在相同河流长度范围内，北方土石山区的河岸边坡面积大于南方红壤区，其中草地和裸地面积占比分别比南方红壤区高出 16.64%和 8.00%，林地和耕地面积占比分别低于南方红壤区 15.17%和 10.08%。河岸边坡水土流失治理应根据各区环境特点，采取适宜的治理方式。研究结果可为区域河岸边坡治理方案的设计提供理论依据。

关键词：平原区；边坡利用类型；沙土区；水土保持区划；水土流失

中图分类号：X171.4；TV85 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2022)02-0138-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.018

Analysis of Land Uses and Characteristics of River Bank Slope in the Plain Area of Jiangsu Province

DAI Mengmeng[1,2], LIANG Yin[1], TIAN Zhiyuan[1], GUO Hongli[3],
YANG Yihui[4], LI Meng[3], GUO Wei[5], HE Yanzi[1,2]

(1.*State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008; 2.*College of Advanced Agricultural Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049; 3.*Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing* 210029; 4.*Rural Water Resources Division, Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing* 210029; 5.*Suqian Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Suqian, Jiangsu* 223800)

Abstract: River bank slope is the main source of soil and water loss in plain area. Land use is an important external factor affecting soil and water loss of slope. The study on land use of river bank slope can provide basic data for soil and water loss control in the region. Based on unmanned aerial vehicle (UAV) aerial images and field survey data, this study counted the areas under four land use types of rivers bank slope in Jiangsu Province, and analyzed the slope use characteristics of sandy soil area, non-sandy soil area and different soil and water conservation regionalizations. The results showed as follows: (1) The land uses of river slope in the study area mainly include grassland, woodland, cultivated land, bare land, slope protection land and others, and the corresponding proportions of each type were 38.15%, 34.45%, 19.66%, 6.10%, 0.93% and 0.70%, respectively. Farmland and bare land accounted for 25.76% of the total. It indicated that the river bank slope was strongly interfered by human beings, and there was a serious risk of soil erosion.

收稿日期：2021-08-10
资助项目：江苏省水利科技项目“江苏省不同区域水土保持率研究与预测”(2020051)
第一作者：代梦梦(1995—)，女，在读硕士研究生，主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail：daimengmeng@issas.ac.cn
通信作者：梁音(1963—)，男，博士，研究员，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

(2) The proportions of woodland, farmland and bare land in sandy soil area were 11.77%, 5.62% and 4.43% higher than those in non-sandy soil area, respectively. The proportions of grassland and slope protection land were 21.00% and 0.63% lower than those in non-sandy soil area, respectively, indicating that the potential risk of soil and water loss in sandy soil area was greater. (3) In the same river length range, the area of river slope in the northern rocky mountain area was larger than that in the southern red soil area . The proportions of grassland and bare land in the rocky mountain area were 16.64% and 8.00% larger than those of the red soil area. The proportions of woodland, farmland and slope protection land in the rocky mountain area were 15.17% and 10.08% lower than those of the red soil area. The appropriate measures should be adopted for soil erosion control according to the environmental characteristics of each region. This research can provide a theoretical basis for the design of regional river slope treatment.

Keywords: plain area; slope use types; sandy soil area; soil and water conservation regionalization; soil erosion

河岸边坡是江苏省平原区发生水土流失的主要策源地[1-2],但是由于平原地区整体的坡度较缓,坡度因子接近于 0,研究与监测工作往往忽略了平原区河岸边坡所发生的水土流失。边坡土体由于离河水近,地下水位高,除自上而下的雨水渗漏外,还受到来自河流横向水分渗漏的影响,因此土壤含水量普遍较高[3-4],而较高的土壤含水量会缩短降雨后的初始产流时间,从而增大地表径流量和土壤侵蚀量[5]。此外,河岸土体的抗剪强度相对较低,在强降雨、地表径流等冲刷下,坡面易产生细沟、切沟侵蚀;在水流冲刷和船行波的扰动下,下部土体被掏蚀,上部土体由于失去支撑形成陡坡或倒坡,进一步发展成为严重的坍塌[6-7]。由于平原区地势平坦,水流速度慢,河岸边坡发生水土流失后进入河流的泥沙会很快沉积下来,进而淤塞河道,削弱河道正常的引排水和调蓄等功能,导致洪涝等灾害。综合前人[8-9]研究发现,河岸边坡水土流失的研究主要关注于河岸侵蚀的发生机理和影响因素,且国内研究主要集中在以长江为主的大江大河段[10-11],有关河岸边坡区域范围内水土流失整体情况的调查研究还未见报导。水土流失动态监测是对区域水土流失现状的宏观把控,但基于目前所使用地形图的空间分辨率,无法准确提取平原区河岸边坡的坡度因子,因此动态监测成果很难反映出平原区河岸边坡的水土流失现状。

土地利用方式是影响水土流失的重要因子之一[12-13],不同土地利用方式通过改变土壤水分[14]、有机质含量[15]和土壤抗蚀性[16]等土壤理化性质,进而影响坡面侵蚀产流产沙过程[17-18]。有研究[19]表明,在坡面上耕地和裸地的单位面积产沙量显著大于水保林和自然草地。随着城市化进程加快,河岸边坡的自然生境遭到破坏[20],前人[21]研究表明,平原区河岸边坡生态环境的干扰主要来自农业生产活动,人类活动显著改变了边坡原有的利用方式[22],严重威胁边坡土体及生态系统的稳定。鉴于上述情况,本研究以江苏省河岸边坡为研究对象,调查区域范围内河岸边坡利用格局,基于无人机航拍和野外实地考察,旨在了解河岸边坡整体的环境状况,以及不同区域的边坡利用特征,以期为国家和地方政府采取河岸边坡水土保持措施,制定水土流失治理方案等提供基础数据和科学依据。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

江苏省位于我国东部沿海地区,介于 116°18′—121°57′E,30°45′—35°20′N,全省陆地总面积为 10.72 万 km^2,地形以平原为主,境内湖泊众多,河网密布,水系发达,尤以太湖平原和里下河平原的河道最为密集。江苏省河道种类众多,全省现有河道 2 万多条,总长度高达 11.11 万 km。研究区属于亚热带向暖温带的过渡区,气候温和,雨量适中,四季分明,全年平均气温在 13～16 ℃,多年平均降水量为 800～1 100 mm,但时空分布不均,降雨多集中在 5—9 月。江苏省经济发达,是长江三角洲的重要组成部分,目前已成为全国综合发展水平最高的省份,并率先开启对河岸边坡的水土流失整治工作。

1.2　数据来源与处理

本研究于 2021 年 4 月采用深圳市大疆创新科技有限公司的精灵 4 RTK 多旋翼无人机对河道及河岸边坡进行航拍。无人机飞行高度为 80 m,航行重叠度为 80%,旁向重叠度为 70%,镜头垂直向下拍摄。航拍影像采用 Pix4D 软件进行拼接处理,输出可见光正射影像图(digital orthophoto map, DOM),并使用 ArcGIS 软件对河岸边坡进行提取。

2　研究方法

2.1　调查河段布设

依据《江苏省骨干河道名录表》[23],按河道主要功能、汇水面积和过水能力等划分,江苏省河道主要包括 4 类,分别为:流域性河道(Ⅰ)、区域性骨干河道(Ⅱ)、其他重要河道(Ⅲ)和县乡河道(Ⅳ)(表 1)。其中流域性河道(Ⅰ)总长度为 0.35 万 km,区域骨干河

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。本研究在综合考虑江苏省水土保持区划(南方红壤区、北方土石山区)和土壤质地(沙性土、非沙性土)的基础上,依据河道类型选择各类河道共 14 条进行无人机航拍,其中 7 条河道位于南方红壤区,7 条河道位于北方土石山区(图 1)。同一河道内布设 3 条河段,共计 42 条河段,其中 19 条河段位于沙土区,23 条河段位于非沙土区。研究设置Ⅰ类河道的 3 条河段之间间隔 20 km,Ⅱ类间隔 10 km,Ⅲ、Ⅳ类间隔 5 km,每条河段沿河流方向拍摄影像 500～700 m 不等。

表 1 调查河段的基本信息

河道类型	河道名称	河段间隔/km	水土保持区划	土壤质地
流域性河道(Ⅰ)	望虞河	20	N	3F
	新沂河	20	B	3F
	中运河	20	B	3S
区域性骨干河道(Ⅱ)	焦港	10	N	3S
	锡北运河	10	N	3F
	南六塘河	10	B	2F、1S
其他重要河道(Ⅲ)	大寨河—大明河	5	N	3S
	走马塘	5	N	3F
	东张河	5	B	2S、1F
	长甸河	5	N	3S
	黄塘河	5	N	3F
县乡河道(Ⅳ)	涟西二干渠	5	B	2S、1F
	姚河	5	B	2S、1F
	伏河	5	B	2F、1S

注:Ⅰ～Ⅳ分别表示 4 个河道类别;N 表示南方红壤区,B 表示北方土石山区;S 表示沙土区,F 表示非沙土区;S、F 前面的数字表示该河道 3 条调查河段分别位于沙土区、非沙土区的数量。

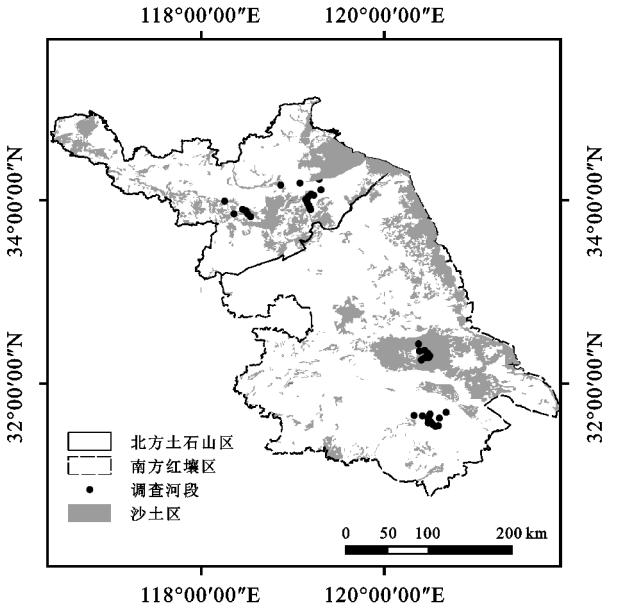

图 1 调查河段在研究区域的分布

2.2 河岸边坡影像提取

河岸边坡具体指河流水位以上的河道迎水侧边坡。结合野外调查的边坡宽度、利用类型等数据,通过对每条河段的正射影像进行分析以确定河岸边坡的影像特征,并利用 ArcGIS 软件对影像中的河岸边坡部分进行识别提取。以南六塘河的第 2 河段为例,见图 2。

2.3 边坡利用类型划分

在《土地利用现状分类》[24]的基础上,结合河岸边坡利用特点,本研究将河岸边坡的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 类(表 2)。

根据各类地物在无人机遥感影像上所反映的颜色、纹理、形状等特征,综合实地考察确定的河岸边坡特征(表 3),利用 ArcGIS 软件,采用目视解译和人工勾绘的方式对各类地物进行提取,获取边坡利用类型空间分布影像,见图 2(c)。

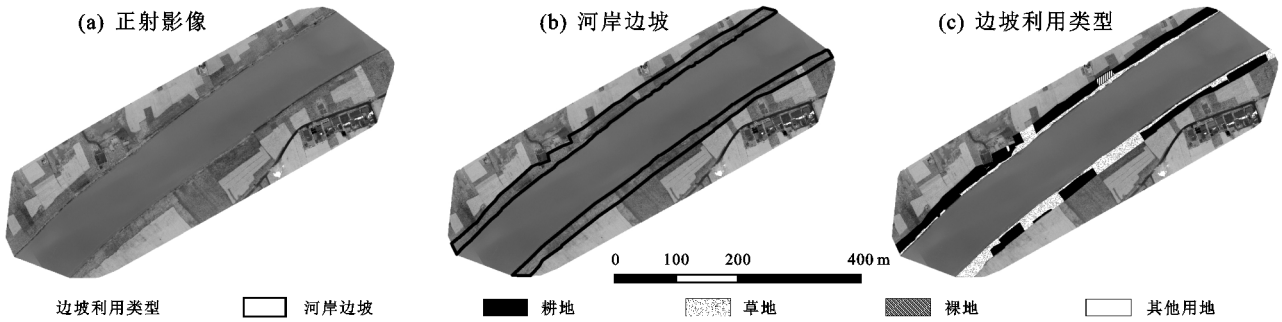

图 2 南六塘河第 2 河段正射影像、提取的河岸边坡及边坡利用类型

表 2 研究区河岸边坡利用现状分类

利用类型	利用现状
草地	生长草本植物为主的土地,以天然一年生草本植物为主
林地	生长乔木、竹类、灌木的土地
耕地	种植农作物的土地,研究区内以油菜、小麦为主
裸地	表层为土质,基本无植被覆盖的土地
护坡工程用地	为防止河岸边坡崩塌或遭受冲刷侵蚀而铺筑混凝土、石块等的土地
其他用地	除上述地类外其他类型的土地,主要包括在边坡内面积较小的房屋、道路等

2.4　统计分析方法

研究利用 ArcGIS 软件的分析工具,统计了各河段的河段长度、水面宽度、边坡宽度(单侧)及边坡面积(双侧)等,并利用 Origin 2017 软件对统计数据进行相关分析。由于无人机航拍成果为正射影像图,因此边坡面积实际是投影面积,边坡宽度是河岸边坡的水平宽度,当河岸垂直于水面时,边坡宽度为 0 m,1 个调查河段采用 1 个平均宽度作为该河段的边坡宽度。

$$K_W=\frac{1}{3}\times(K_1+K_2+K_3) \tag{1}$$

$$K_P=\frac{M}{2\times L} \tag{2}$$

式中:K_W为水面宽度(m);K_1、K_2、K_3分别为在河段正射影像图中上、中、下 3 个位置的水面宽度(m);K_P为单侧的边坡宽度(m);M 为双侧的边坡面积(m^2);L 为河段长度(m)。

表 3　无人机影像解译河岸边坡标志

利用类型	影像特征
草地	草地一般呈绿色、浅绿色,纹理复杂,形状不规则,不同区域的草地郁闭度差异较大
林地	林地一般呈绿色至深绿色,纹理粗糙,形状一般不规则,郁闭度较高
耕地	耕地呈绿色至深绿色,纹理单一,形状规则
裸地	裸地呈棕色,纹理单一,形状不规则
护坡工程用地	护坡工程用地呈亮白色,纹理平滑,形状为规则的条带状,平行于河流方向
其他用地	房屋无固定颜色,纹理复杂,形状规则,边界整齐,多为矩形;道路呈亮白色,纹理均一,条带状分布,与河流存在一定的夹角

由于调查河段长度不一,为比较不同河段的边坡情况,需要先对河岸边坡的面积进行归一化处理,研究统一计算了每条河段沿河流 100 m 范围内各利用类型下的边坡面积(双侧)。

$$S_{ij}=\frac{M_{ij}}{L_i}\times 100 \tag{3}$$

$$S_j=\frac{1}{n}\times\sum_{i=1}^{n}S_{ij} \tag{4}$$

$$S_{总体}=\sum_{m=1}^{4}(P_m\times S_m) \tag{5}$$

式中:S_{ij}为沿河道 100 m 内第 i 条河段、第 j 种利用类型的边坡面积(m^2/100 m),i 取 1～42,j 取 1～6;M_{ij}为第 i 条河段、第 j 种利用类型统计面积(m^2);L_i为第 i 条河段的河道长度(m);S_j 为沿河道 100 m 内第 j 种利用类型的平均边坡面积(m^2/100 m);n 为调查河段个数;$S_{总体}$为研究区内所有河道边坡的面积(m^2/100 m);S_m表示 m 类河道的河岸边坡面积(m^2/100 m),m 取 1～4;P_m表示 m 类河道长度占全省河道总长度的比例(%)。

3　结果与分析

3.1　河岸边坡宽度与水面宽度的关系

河岸作为河流向陆地过渡的缓冲带,边坡坡度、边坡宽度等微地形是影响其发生水力侵蚀的主要因素。本研究在野外调查中发现,边坡坡度主要集中在 10°～30°,发生水土流失的风险较大。同时,调查发现河岸边坡宽度的差异较大,为探究边坡宽度与水面宽度的关系,研究计算了不同类别河道下各河段的水面宽度及边坡宽度,并统计了 42 条调查河段边坡宽度的基本统计学特征。结果表明,从流域性河道(Ⅰ)到县乡河道(Ⅳ),平均边坡宽度总体上呈逐渐减小的趋势(表 4)。其中Ⅰ类河道的边坡宽度最大,平均边坡宽度可达 23.29 m,Ⅳ类河道的边坡宽度最小,平均边坡宽度为 6.10 m,Ⅱ类和Ⅲ类河道的平均边坡宽度相近,分别为 9.64,8.53 m,但二者的变异系数相差较大(表 4)。4 类河道的河岸边坡宽度的变异系数介于 0.37～0.95,表现为中等程度变异性,但Ⅰ类和Ⅱ类河道的变异系数远大于Ⅲ类和Ⅳ类河道,这可能是由于大型河道两岸多采取硬质护岸等措施,隔绝自然条件下河流对边坡土体的冲刷,工程对河岸的改造作用较大,从而影响边坡宽度。值得注意的是,垂直护岸工程改变Ⅰ类和Ⅱ类河道的自然边坡结构,导致出现河岸边坡宽度为 0 m 的情况,造成边坡宽度的变异性较大。硬质护岸措施虽然保护边坡免受水流的冲刷,但也使得河岸边坡的自然生境遭到破坏,失去原有的生机。建议在护岸护坡工程建设中,可以结合河流的自然生境特点采用生态护坡模式,比如石笼生态护坡、土工格室制草护坡、浆砌片石骨架植草护坡等。采用线性函数进一步量化宽度>0 m 的河岸边坡宽度与水面宽度的关系发现,河岸边坡宽度随水面宽度的增大,大致呈逐渐增加的趋势(图 3),表明水流在河岸边坡的塑造中发挥重要作用。

表 4　4 类河道的河岸边坡宽度统计学特征

单位:m

河道类型	最大值	最小值	均值	中值	变异系数
流域性河道(Ⅰ)	47.75	0	23.29	20.73	0.75
区域性骨干河道(Ⅱ)	31.25	0	9.64	5.02	0.95
其他重要河道(Ⅲ)	14.76	4.53	8.53	9.45	0.41
县乡河道(Ⅳ)	10.58	3.15	6.10	5.81	0.37

3.2　4 类河道的边坡利用类型与水土流失

利用 ArcGIS 软件对研究区内 4 类河道的河岸

边坡面积进行统计，进而分析河道类别与边坡面积的关系。由表 5 可知，江苏省所有河道的平均边坡面积为 1 467.50 m^2/100 m。从县乡河道(Ⅳ)到流域性河道(Ⅰ)，边坡面积总体上呈逐渐增大的趋势，其中流域性河道(Ⅰ)的边坡面积最大，为 4 657.07 m^2/100 m，是区域性骨干河道(Ⅱ)的 2.42 倍，其他重要河道(Ⅲ)的 2.09 倍，县乡河道边坡(Ⅳ)的 3.82 倍(表 5)。

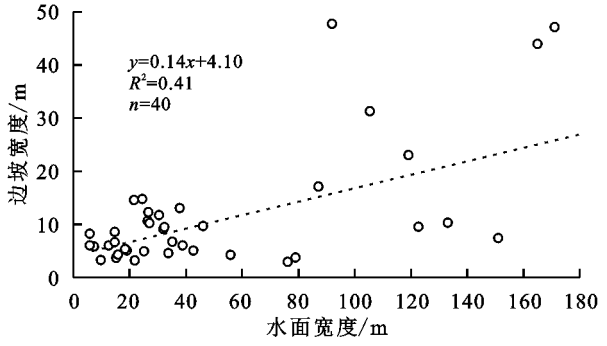

图 3 边坡宽度随水面宽度的变化趋势

表 5 4 类河道不同利用类型下的边坡面积统计

单位：m^2/100 m

利用类型	合计	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)
草地	559.86	1756.13	543.61	868.03	474.71
林地	505.55	2045.07	632.99	812.80	398.94
耕地	288.57	215.25	608.41	328.43	266.13
裸地	89.54	91.12	49.16	190.09	78.31
护坡工程用地	13.68	359.40	53.00	2.30	0
其他	10.29	190.10	40.87	21.37	0.24
合计	1467.50	4657.07	1928.04	2223.01	1218.33

对 4 类河道不同利用类型的河岸边坡面积占比进行统计(图 4)可知，江苏省河岸边坡的利用类型以草地、林地和耕地为主，分别占边坡总面积的 38.15%，34.45%和 19.66%，而裸地、护坡工程用地和其他用地的面积占比较小，分别为 6.10%，0.93%和 0.70%。各类河道的河岸边坡土地利用结构特征不尽相同。其中流域性河道(Ⅰ)边坡利用类型以林地和草地为主，分别占总面积的 43.91%和 37.71%；区域性骨干河道(Ⅱ)以林地、耕地和草地为主，分别占总面积的 32.83%，31.56%，28.20%；其他重要河道(Ⅲ)和县乡河道(Ⅳ)均以草地、林地、耕地为主，分别占总面积的 39.05%，36.56%，14.77%和 38.96%，32.74%，21.84%(图 4)。

河岸边坡各利用类型在不同河道类别中存在差异。其中，草地和林地面积在各类河道的边坡中均占有较大的比重，但在流域性河道(Ⅰ)和区域性骨干河道(Ⅱ)为林地面积占比大于草地，而在其他重要河道(Ⅲ)和县乡河道(Ⅳ)为草地面积占比大于林地(图 4)，这可能是由于在大型河道整治中岸坡防护林的建设提高了河岸边坡的林地面积占比。

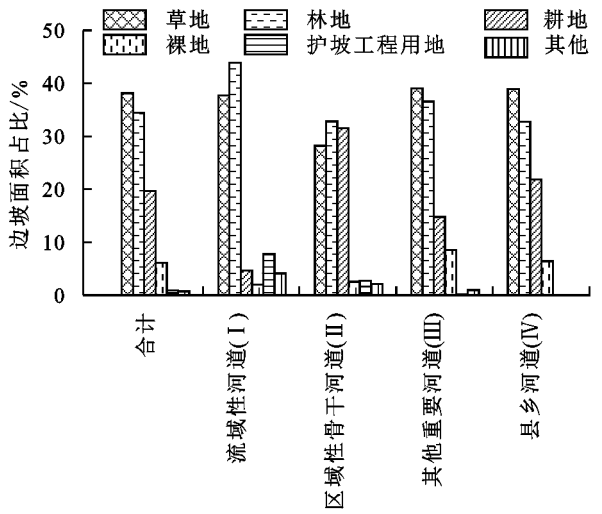

图 4 4 类河道不同利用类型边坡面积占比

另外，耕地仅在流域性河道(Ⅰ)边坡中的面积占比较小，为 4.62%，但在其他 3 个类型河道的边坡中均占有较大的比重，Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类河道占比分别为 31.56%，14.77%，21.88%(图 4)。此外，由于耕地受到频繁的人为扰动，加剧坡面水土流失的程度。结果表明，研究区内的土地资源紧缺，群众在河岸边坡上开垦耕种的现象普遍存在。边坡耕地面积在Ⅰ类河道的占比较小，表明对大型河道的严格管理能有效控制边坡耕地面积。

在野外调查中发现，流域性河道(Ⅰ)和区域性骨干河道(Ⅱ)的裸地主要来自河道两侧的生产建设项目弃土，其他重要河道(Ⅲ)和县乡河道(Ⅳ)边坡的裸地则主要是因河道疏浚的弃土就地堆积，将原本的植被覆盖造成。由于缺少必要的植被覆盖，裸露的边坡在受到雨滴击溅后，快速形成地表结皮，减少雨水入渗，从而增大径流量，增强土壤侵蚀程度[25-26]。统计结果显示，裸地面积占比在Ⅰ、Ⅱ类河道分别为 1.96%和 2.55%，在Ⅲ、Ⅳ类河道分别为 8.55%和 6.43%(图 4)，表明生产建设活动对河岸边坡水土流失的影响程度较轻，但研究区内小型河道淤积问题比较突出。

护坡工程是为防止边坡侵蚀而修建，可以反映政府对于河道保护的投入程度。由图 4 可知，护坡工程用地面积占比从流域性河道(Ⅰ)到县乡河道(Ⅳ)呈逐渐降低的趋势，表明目前研究区内对大型河道边坡防护的重视程度较高，对小型河道边坡的关注度较低。其他用地(包括房屋与道路)面积占比从流域性河道(Ⅰ)到县乡河道(Ⅳ)也呈逐渐降低的趋势，但总体占比较小，均低于 5%，对边坡的影响不明显。

3.3 沙土区和非沙土区河岸边坡利用特征

江苏省平原沙土区面积高达 2 万 km^2，主要包括通南高沙土区、沿海平原沙土区和黄河故道高亢沙土区[27]。沙土区内土壤以细沙和粉沙为主，土质松散，结构性较差，土壤抗蚀抗冲能力弱，沙性河岸边坡在地表径流的作用下，更易发生水土流失[2,28-30]。为探究

河岸边坡面积与土壤性质的关系,研究统计了各类河道在沙土区和非沙土区的河岸边坡面积。从表 6 可以看出,江苏省整体的沙土区边坡面积略大于非沙土区,但不同类别河道之间存在差异:Ⅰ、Ⅱ类河道的边坡面积为沙土区小于非沙土区,Ⅲ、Ⅳ类河道为沙土区大于非沙土区。这可能是由于沙性边坡土质疏松,在河流高水位的浸泡和冲刷下,容易形成更为宽阔的边坡。但在大型河道中水流和船行波作用强烈,松散的沙性土壤抗冲刷性能弱,边坡土体易随水流失,严重时甚至发生坍塌,造成最终形成的边坡宽度较窄。

表 6　不同土壤性质下 4 类河道的河岸边坡利用类型面积统计　　单位:m^2/100 m

河岸边坡	合计		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)	
利用类型	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F
草地	449.55	694.30	1122.13	2073.13	714.29	407.07	720.65	1400.68	371.48	565.03
林地	601.12	369.52	1527.55	2303.83	295.01	903.38	1066.34	178.96	522.52	290.80
耕地	347.61	230.26	417.00	114.38	340.81	822.50	372.71	217.72	342.05	199.70
裸地	162.42	82.25	257.23	8.06	62.88	38.17	506.51	409.31	118.33	43.30
护坡工程用地	8.05	15.94	76.48	500.86	113.48	4.61	0.73	6.24	0	0
其他用地	8.16	10.00	146.81	211.75	1.78	72.14	29.91	0	0.46	0.05
总计	1576.90	1402.27	3547.19	5212.01	1528.26	2247.87	2696.85	2212.91	1354.84	1098.89

注:S 表示沙土区;F 表示非沙土区。

为进一步探究河岸边坡土地利用特征与土壤性质的关系,研究统计了 4 类河道中各利用类型在沙土区和非沙土区的面积占比(图 5)。结果表明,除区域性骨干河道(Ⅱ)外,草地面积占比在各类河道均为沙土区小于非沙土区,耕地面积占比均为沙土区大于非沙土区。林地面积占比总体上为沙土区大于非沙土区,可能是因为沙性边坡存在更大的水土流失的风险,因此边坡防护林的建设主要在沙土区。然而林地面积在各类河道之间存在差异:Ⅰ、Ⅱ类河道为沙土区小于非沙土区,Ⅲ、Ⅳ类河道为沙土区大于非沙土区。裸地面积占比在各类河道的河岸边坡中均为沙土区大于非沙土区,而护坡工程用地在沙土区的面积占比总体上小于非沙土区。综合分析可知,相较于非沙土区,沙土区林地、耕地和裸地面积占比更大,而草地、护坡工程用地面积占比更小,自然和人为因素都增大了沙土区水土流失的风险。

3.4　不同水土保持区划河岸边坡利用特征

为探究河岸边坡面积在不同水土保持区划中的异同,将调查河段归类为南方红壤区(N)和北方土石山区(B),分别统计各类河道不同利用类型的河岸边坡面积。从表 7 可以看出,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类河道的边坡面积均是北方土石山区大于南方红壤区。流域性河道(Ⅰ)在北方土石山区的边坡面积为南方红壤区的 5.46倍,区域性骨干河道(Ⅱ)为 4.82 倍,其他重要河道(Ⅲ)为 1.49 倍,而县乡河道(Ⅳ)在 2 个分区的面积相近,表明沿河流 100 m 范围内北方土石山区的边坡面积整体上大于南方红壤区,但从流域性河道(Ⅰ)到县乡河道(Ⅳ),二者的差距逐渐减小。

表 7　不同水土保持区划下 4 类河道的河岸边坡利用类型面积统计　　单位:m^2/100 m

河岸边坡	合计		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)	
利用类型	N	B	N	B	N	B	N	B	N	B
草地	356.17	735.85	527.63	2370.38	238.47	1153.89	513.54	1340.67	335.71	567.38
林地	560.77	469.34	454.46	2840.38	320.99	1257.00	979.83	590.09	522.59	316.50
耕地	348.90	281.22	22.42	311.67	179.62	1466.00	256.90	423.81	383.94	187.59
裸地	13.96	151.30	1.11	136.12	27.76	91.95	48.25	379.21	8.93	124.57
护坡工程用地	9.43	13.67	167.10	455.55	79.50	0	4.03	0	0	0
其他用地	4.66	14.57	0	285.15	1.19	120.24	37.39	0	0.61	0
总计	1293.89	1665.94	1172.72	6399.25	847.52	4089.09	1839.94	2733.78	1251.77	1196.04

注:N 表示南方红壤区;B 表示北方土石山区。

为进一步探究边坡利用特征对水土保持区划的响应,研究统计了 4 类河道不同河岸边坡利用类型在南方红壤区与北方土石山区的面积占比。从图 6 可以看出,草地和林地的边坡面积在南方红壤区和北方土石山区各类河道中均占有较大比重,但呈现出完全相反的规律:除流域性河道(Ⅰ)以外,草地面积占比均为南方红壤区小于北方土石山区,林地面积占比均为南方红壤区大于北方土石山区,这可能是因为南方红壤区充沛的水热条件更有利于乔灌木的生长。耕地面积占比总体上为南方红壤区大于北方土石山区,这可能是由于苏南地区经济发展迅速,土地资源紧缺,耕地进一步向河岸边坡扩张。护坡工程用地主要分布在流域性河道(Ⅰ)和区域性骨干河道(Ⅱ),且在这 2 类河道的河岸边坡中面积占比均为南方红壤区大于北方土石山区,这种差异可能是由于苏南和苏北两区发展不平衡的经济造成。苏北地区经济发展水平与苏南存在着较大的差距[31],这导致耗费资金的护坡工程主要分布在苏南地区。除区域型骨干河道(Ⅱ)以外,裸地面积占比

均为北方土石山区大于南方红壤区，由于裸露地表直接受到雨滴击溅和径流冲刷作用，极易被侵蚀，表明北方土石山区存在更大的水土流失风险。

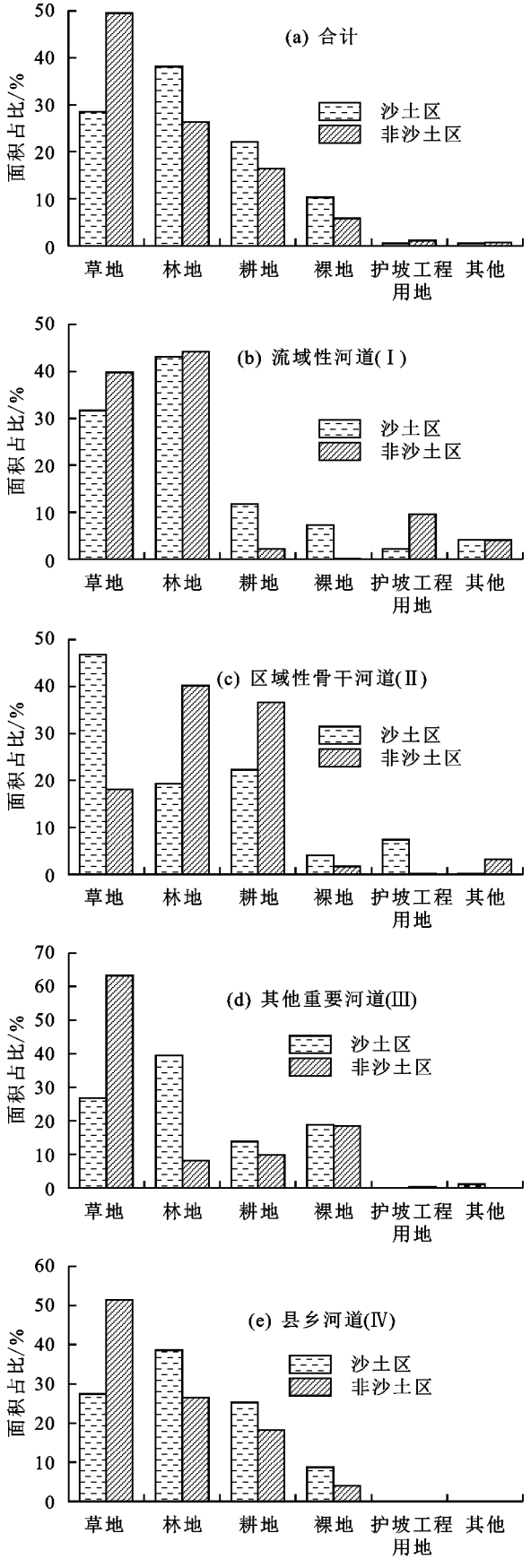

图 5 4 类河道不同利用类型在沙土区和非沙土区面积占比

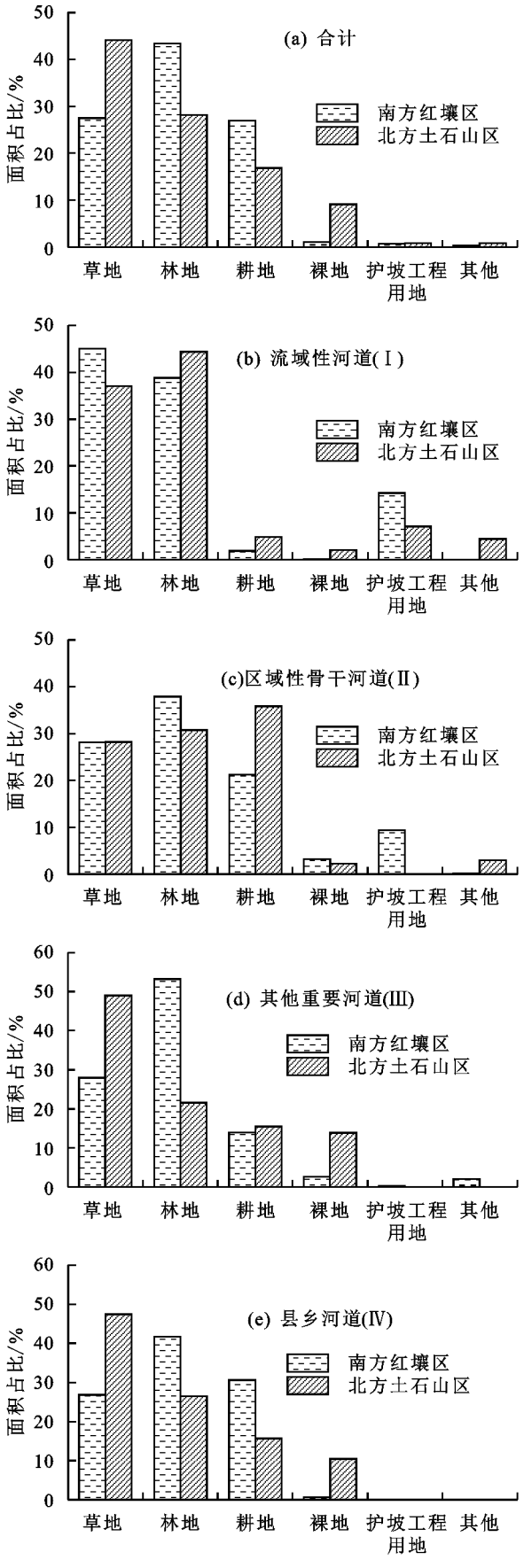

图 6 4 类河道不同利用类型在不同水土保持区划面积占比

4 结论

(1)江苏省河岸边坡不同利用类型面积占比整体

呈现出草地>林地>耕地>裸地>护坡工程用地>其他用地,在不同类型河道中则略有差异。

(2)沙土区河岸边坡耕地和裸地面积占比大于非沙土区,而护坡工程用地面积占比小于非沙土区,表明沙土区发生水土流失的风险更大。

(3)沿河流 100 m 长度范围内,北方土石山区河岸边坡面积整体上大于南方红壤区。其中草地和裸地面积占比大于南方红壤区,林地、耕地和护坡工程用地面积占比小于红壤区。河岸边坡水土流失的治理应根据各区环境特点,采取适宜的治理方式。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 李冬林,韩丽,阮宏华,等.秦淮河河岸带土壤理化性质分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2008,32(4):17-22.

[4] Simon A, Curini A, Darby S E D, et al. Bank and near-bank processes in an incised channel[J]. Geomorphology,2000,35(3):193-217.

[5] 胡国锋,王济,蔡雄飞,等.初始含水量对土壤侵蚀的影响研究进展[J].贵州农业科学,2013,41(5):100-103.

[6] 毛新伟,石亚东,高琦.太湖流域平原河网地区水土流失及治理措施[J].东北水利水电,2007,25(6):55-56.

[7] 王延贵,匡尚富.河岸淘刷及其对河岸崩塌的影响[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(4):251-257,296.

[8] Darby S E, Rinaldi M, Dapporto S. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks[J/OL]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(3). DOI: 10.1029/2006JF000722.

[9] Wolman M G. Factors influencing erosion of a cohesive river bank[J]. American Journal of Science, 1959, 257(3):204-216.

[10] 刘祥玉,刘晓辉,高清洋,等.长江中下游顺直河道水流冲刷引发崩岸的模拟试验[J].水运工程,2019(4):90-97.

[11] 张幸农,蒋传丰,陈长英,等.江河崩岸的影响因素分析[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(1):36-40.

[12] 赵护兵,刘国彬,曹清玉,等.黄土丘陵区不同土地利用方式水土流失及养分保蓄效应研究[J].水土保持学报,2006,20(1):20-24,54.

[13] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等.南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J].农业工程学报,2012,28(2):239-243.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 赵鸣飞,康慕谊,刘全儒,等.东江干流河岸带植物多样性分布规律及影响因素[J].资源科学,2013,35(3):488-495.

[21] 修晨,郑华,欧阳志云.不同类型人类活动干扰对河岸带外来植物群落的影响:以北京永定河为例[J].生态学报,2016,36(15):4689-4698.

[22] Chen F X, Lu S Y, Hu X Z, et al. Multi-dimensional habitat vegetation restoration mode for lake riparian zone, Taihu, China[J]. Ecological Engineering, 2019, 134:56-64.

[23] 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.

[24] 中华人民共和国国家标准.土地利用现状分类 GB/T 21010-2017 [S].北京:中国标准出版社,2007.

[25] 赵清贺,冀晓玉,徐珊珊,等.河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J].农业工程学报,2018,34(13):170-178.

[26] 吕晶,高甲荣,娄会品,等.不同植物护岸措施水土保持效益研究[J].中国农村水利水电,2009(12):92-94,98.

[27] 刘复新,朱克成,李兰.江苏省平原沙土区的水土流失与治理[J].中国水土保持,1989(6):14-15,65.

[28] 沈波,胡海波,肖海涛.通南高沙土区农田土壤侵蚀规律研究[J].水土保持学报,2002,16(3):129-131.

[29] 胡海波,林文棣,张金池.江苏沿海平原沙土区土壤侵蚀规律的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),1992,16(2):25-30.

[30] 吕其浪.废黄河沙土区土壤侵蚀量分析[J].水土保持通报,2010,30(2):233-235.

[31] 简晓彬,沈正平,刘宁宁.苏北与苏中、苏南经济发展差异的演变及成因探析[J].经济问题探索,2007(2):53-59.