

三江源国家公园土壤侵蚀及其分布特征

黄婷婷¹, 赵辉¹, 赵院¹, 任婧宇², 李子轩³, 李斌斌¹

(1.水利部水土保持监测中心, 北京 100053; 2.黄河流域水土保持生态环境监测中心, 陕西 西安 710021; 3.海河流域水土保持监测中心站, 天津 300170)

摘要: [目的] 三江源是“中华水塔”和中国重要生态安全屏障。探讨三江源国家公园土壤侵蚀分布规律, 为实施生态保护政策及三江源国家公园水土保持与生态文明建设提供依据。[方法] 利用中国土壤流失方程(CSLE)、风力侵蚀模型和冻融侵蚀强度评价模型, 采用叠加分析的方法, 分析三江源国家公园土壤侵蚀状况及其在不同空间和下垫面的分布特征。[结果] 2020年公园土壤侵蚀面积 2.64×10^4 km², 黄河源园区是土壤侵蚀分布最广泛的园区, 而长江源园区土壤侵蚀相对严重; 70%的水力侵蚀面积分布在地下冰发育带(海拔4 900 m以上), 85%的风力侵蚀面积分布在地下冰发育带以下区域(海拔4 900 m以下), 不同海拔高度区域土壤侵蚀及其分布差异显著; 坡度5°及以下区域风力侵蚀面积比例达60%, 是风力侵蚀相对集中分布区; 水力侵蚀相对集中分布在8°~25°区域, 水力侵蚀面积比例达75%, 均是水土流失综合防治的重点区域; 草地面积比例近80%, 低覆盖、中低覆盖草地土壤侵蚀相对集中分布, 沙地、裸土地的土壤侵蚀问题相对严重, 值得重点关注。[结论] 三江源国家公园水力侵蚀主要分布在海拔4 900 m以上地下冰发育带, 8°~35°的中低覆盖以下草地, 占水力侵蚀面积的2/3左右; 风力侵蚀主要集中在4 200~4 900 m, ≤5°的中覆盖度以下草地。

关键词: 土壤侵蚀; 海拔高度; 坡度; 地表覆盖; 空间分布; 三江源国家公园

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0095-09

中图分类号: S157

文献参数: 黄婷婷, 赵辉, 赵院, 等. 三江源国家公园土壤侵蚀及其分布特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 95-103. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20231016.001; Huang Tingting, Zhao Hui, Zhao Yuan, et al. Soil erosion and its spatial distribution characteristics in Three-River-Source National Park [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 95-103.

Soil Erosion and Its Spatial Distribution Characteristics in Three-River-Source National Park

Huang Tingting¹, Zhao Hui¹, Zhao Yuan¹, Ren Jingyu², Li Zixuan³, Li Binbin¹

(1. Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water

Resources, Beijing 100053, China; 2. Monitoring Center for Soil and Water

Conservation and Ecological Environment of Yellow River Basin, Xi'an, Shaanxi 710021,

China; 3. Haihe River Basin Soil and Water Conservation Monitoring Center, Tianjin 300170, China)

Abstract: [Objective] The Three-River-Source National Park (TRSNP) is considered to be the “water tower of China”, and is an important ecological security barrier in China. The soil erosion distribution law of TRSNP was studied to provide a basis for implementing ecological protection policy, soil and water conservation, and ecological civilization construction in TRSNP. [Methods] Based on the Chinese soil loss equation (CSLE), wind erosion model and freeze-thaw erosion intensity model, the soil erosion status and its distribution characteristics at different space and surface of TRSNP were analyzed by superposition analysis. [Results] In 2020, an area of 2.64×10^4 km² suffered from soil erosion in TRSNP. Among the three sub-parks, the Yellow-River-Source Park exhibited the most extensive soil erosion, whereas the Yangtze-River-Source Park

收稿日期: 2023-07-25

修回日期: 2023-08-23

资助项目: 水利部财政预算项目“全国水土流失动态监测项目”(126216229000200002); 国家自然科学基金项目“基于侵蚀能量过程的集合式流域水土流失预报模型”(U2040208); 国家自然科学基金面上项目“黄土高原坡面土壤侵蚀特征地带性变化及驱动机制”(42077071)

第一作者: 黄婷婷(1994—), 女(汉族), 山东省莱西市人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持遥感监测技术研究。Email: tingting.occ@163.com。

通信作者: 赵辉(1971—), 男(汉族), 湖南省衡阳市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持研究。Email: 7166zhaohui@163.com。

was subject to severe erosion comparatively. Soil erosion and its spatial distribution varied significantly at different elevations. Water erosion occurred mainly in the area with elevations above 4 900 m, which occupied 70% of the land area. However, 85% of the wind erosion occurred in zones with elevations less than 4 900 m. The wind erosion area with slopes between 0° and 5° accounted for 60%, which is the relatively concentrated distribution area of wind erosion. And three-quarters of water erosion areas were concentrated in regions where the slope ranged from 8° to 25° , all of which require urgent conservation measures. Grassland was the most important land cover in TRSNP, occupying about 80% of the area, with low and medium-low vegetation cover being responsible for significant soil losses. Additionally, sandy land and bare land were prone to high intensity soil erosion, which deserved special attention. [Conclusion] Two-thirds of water erosion areas were primarily located in zones where the elevation was above 4 900 m, slope gradients were between 8° and 35° , and grassland cover was below medium-low cover. Wind erosion was primarily located at elevations ranging from 4 200 m to 4 900 m, slopes were less than 5° , and grassland coverage was below medium-low cover.

Keywords: soil erosion; elevation; slope; vegetation coverage; spatial distribution; Three-River-Source National Park

三江源是“中华水塔”和中国重要生态安全屏障。2017年,三江源国家公园纳入国家公园体制试点,因其位置独特,生态环境问题显得尤为重要,事关中国生态安全和长远发展^[1]。水土流失是各类生态退化的集中反映^[2]。三江源地区涉及水力、风力、冻融等土壤侵蚀类型^[3]。水力侵蚀一直是三江源地区生态环境研究的重点内容,相比冻融侵蚀和风力侵蚀研究涉及的面广,也更为深入^[3]。多位学者研究发现,三江源地区土壤侵蚀主要受植被^[4-7]、气候变化^[6-10]、人为扰动^[11-12]、地形地貌等^[13-14]因素影响。黄麟等^[13]基于1995年分辨率为1 km的土壤侵蚀数据,研究发现三江源草地水力侵蚀主要发生在 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$,风力侵蚀主要发生在 $<3^{\circ}$ 的阴坡,风力侵蚀集中分布区域的海拔高度明显低于水力侵蚀。李国荣等^[15]认为黄河源区高寒草甸植被覆盖度与土壤侵蚀强度呈显著的负相关关系。在土壤侵蚀研究方法上,主要有径流小区观测、核素示踪法、经验模型模拟法等。径流小区观测主要应用在长江源区和黄河源区草地土壤侵蚀^[15-16]、青藏高原公路边坡侵蚀^[17],虽然监测精度高,但数量和分布密度低,无法直接分析较大空间尺度上的土壤侵蚀分布格局。核素示踪法主要应用于草地土壤侵蚀状况研究,但其背景值采样和测量误差较大,需要较多地采用平行对比和合理性评价^[18]。通用土壤流失方程USLE、修正通用土壤流失方程RUSLE、中国土壤流失方程CSLE等经验模型,考虑因素全面、适用广泛,可有效反映区域尺度土壤侵蚀空间格局。

由于三江源地区自然条件恶劣,多种土壤侵蚀类型在时间和空间上交错进行^[18],成因和机理机制复杂。前述研究在一定程度上揭示了三江源地区的土壤侵蚀规律,但研究范围或内容相对局限,未从整体空间格局上揭示土壤侵蚀分布规律。同时由于所采

用的遥感数据源空间分辨率低(解译数据源分辨率一般为30 m,植被盖度数据源分辨率一般为1 000~250 m),土壤侵蚀量估算方法区域适用性差,下垫面影响因素综合分析不够系统,在一定程度上影响了土壤侵蚀空间分布的精度。已有研究分析的土壤侵蚀类型往往较单一,单就水力侵蚀或风力侵蚀进行研究,没有综合考虑多种侵蚀类型叠加的复合分布,或仅针对草地等单一土地利用类型进行分析。因此,如何提高三江源地区,尤其是三江源国家公园的遥感数据源空间分辨率,实现水力、风力等主要土壤侵蚀类型基于下垫面影响因素的综合分析,提高土壤侵蚀空间分布规律研究精度,相关研究尚有待进一步深化。

2021年9月,国务院批准设立三江源国家公园,党和政府高度重视,明确要求坚持生态保护第一,全面加强源头区生态系统保护,系统修复和综合治理,并要求建立严格的管控制度,强化监督管理^[19]。系统研究三江源国家公园的土壤侵蚀问题,掌握其生态环境状况及其动态变化规律,对于规划公园山水林田湖草沙冰系统治理方案和生态修复措施布局,完善预防保护制度,强化政策制度和资金投入等都具有较强的实践指导意义。本文基于2 m空间分辨率遥感影像,采用CSLE水力侵蚀模型、风力侵蚀模型和冻融侵蚀强度评价模型分别定量计算水力、风力土壤侵蚀模数和冻融侵蚀强度综合指数,进行土壤侵蚀强度评价,分析研究三江源国家公园土壤侵蚀状况及其在不同空间和下垫面状况下的分布特征,旨在揭示该区土壤侵蚀空间分布格局及其规律,为三江源国家公园水土保持与生态文明建设提供基础依据。

1 研究区概况

三江源国家公园地处青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江的发源地,地理坐标为 $89^{\circ}50' - 99^{\circ}14'E$,

32°22′—36°47′N。涉及青海省治多、曲麻莱、玛多、杂多4县和格尔木市唐古拉山乡。土地总面积12.31×10⁴ km²,按流域,可划分为长江源园区(面积9.03×10⁴ km²,73.52%)、黄河源园区(面积1.91×10⁴ km²,15.27%)、澜沧江源园区(面积1.37×10⁴ km²,11.21%)。地貌以山原和高山峡谷为主,山地占总面积的70%以上,山高坡陡,地形切割剧烈,海拔介于3780 m~6824 m之间,平均海拔4500 m以上。属青藏高原气候区北端尾间区,冷热两季、雨热同期、冬长夏短,年均气温在-0.56~7.8℃之间,年均降水量262.2 mm~772.8 mm,自西北向东南依次递补增,年均≥8级大风日数为3.9~110 d,年均日照时数2300~2900 h,无绝对无霜期。区域地质构造复杂,土壤属青南高原山土区系,垂直地带性分布规律明显,由高到低,依次为高山寒漠土—高山草甸土—高山草原土—山地草甸土—灰褐土—栗钙土—山地森林土,以高山草甸土为主,沼泽化草甸土分布较广,局地冻土层极为发育。属于青藏高原高寒植被类型区,水平和垂直带谱均十分明显,以高山草甸和高寒草原为主。森林植被以寒温性针叶林为主,主要分布有川西云杉(*Picea likiangensis* var. *rubescens*)、紫果云杉(*Picea purpurea*)等,灌丛植被主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)等,草本植物主要有矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)等。该区域人口稀少,2020年仅有7.20×10⁴人口。土地利用相对单一,草地约占总面积的80%,裸岩石砾地、水域分别约占10%。

2 数据与方法

2.1 数据及处理

(1) 遥感影像数据:2020年211景2 m分辨率的高分一号、六号、二号等影像,用于土地利用和水土保持措施解译,公园土地利用涉及林地、草地、建设用地、交通运输用地、水域及水利设施用地、其他土地6个土地利用一级类,无工程措施。2017—2019年持续3 a半月尺度的250 m分辨率MODIS和30 m分辨率Landsat 8多光谱影像,Landsat数据提取的归一化植被指数NDVI与MOD13Q1产品经插补、融合、像元二分法计算获得24个半月30 m分辨率的植被覆盖度^[20],参与水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀因子计算。基于25 km分辨率的AMSR-E level 2 A亮温数据,计算地表温度,反演土壤水分,获取表土湿度因子^[20]。利用AMSR-E亮温数据产品判断一日

之内是否发生冻融循环过程,得到冻融日循环天数^[21-22],反演日均冻融相变水量^[23]。

(2) 收集涉及的治多、曲麻莱、玛多等5个县级气象站日降雨和整点风速风向资料,通过数据插补,获取1986—2015年逐日日降雨资料,计算水力侵蚀因子中的降雨侵蚀力因子,以及冻融侵蚀强度评价因子中的年均降水量;获取1991—2015年逐日4时(2:00,8:00,14:00,20:00)整点风速资料,计算风力侵蚀模型中的风力因子。

(3) 收集各县域1:5万数字化等高线并生成DEM,计算坡度和坡长因子。

(4) 按《第一次全国水利普查培训教材之六:水土保持情况普查》^[20],将上述因子均重采样为10 m分辨率栅格数据。

2.2 研究方法

(1) 水力侵蚀计算与评价方法。采用中国土壤流失方程CSLE(Chinese soil loss equation)计算水力侵蚀模数^[24]。

$$A = RKLSBET \quad (1)$$

式中:A为土壤侵蚀模数[t/(hm²·a)];R为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·h·a)];K为土壤可蚀性因子[t·hm²·h/(hm²·MJ·mm)];L为坡长因子,无量纲;S为坡度因子,无量纲;B,E,T分别为生物、工程、耕作措施因子,无量纲。R因子基于1986—2015年逐日日降雨资料,利用冷暖季日降雨量估算模型计算24个半月平均降雨侵蚀力,加权求和得到多年平均年降雨侵蚀力R^[25]。K因子沿用第一次全国水利普查水土保持专项调查中的土壤可蚀性因子估算成果^[20]。L因子、S因子基于1:5万地形图,利用坡长坡度因子计算工具计算获得^[26-27]。林地、草地的B值结合土地利用、植被覆盖度和半月降雨侵蚀力占年降雨侵蚀力的比例,加权计算得到^[26];其他地类的B因子赋值计算获得,城镇建设用地、农村建设用地、人为扰动用地、其他建设用地、农村道路、其他交通用地、水域及水利设施用地、其他土地(盐碱地、裸岩石砾地和沙地)、裸土地分别赋值为0.01,0.025,1,0.01,1,0.01,0,0,1。三江源国家公园没有工程措施、耕作措施,E,T因子皆赋值为1。

采用ArcGIS 10.2,计算获得基于10 m×10 m栅格的土壤侵蚀模数,按照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-2007)^[28]进行水力侵蚀强度评价。

(2) 风力侵蚀计算与评价方法。分别选用草(灌)地、沙地(漠)风力侵蚀模型,计算风力侵蚀模数^[29]。

草(灌)地风力侵蚀模型适用于园地中的果园、茶

园和其他园地,林地中的有林地、灌木林地、其他林地,以及草地中的天然牧草地、人工牧草地和其他草地,基本形式为:

$$Q_{fg} = 0.018(1-W) \sum_{j=1}^{35} T_j \exp\left(2.4869 - 0.0014V^2 - \frac{61.3935}{U_j}\right) \quad (2)$$

$$T_j = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^{24} (t_{jmik}) \quad (3)$$

式中: Q_{fg} 为每半个月內草(灌)地风力侵蚀模数[t/(hm²·a)]; W 为每半个月內表土湿度因子,介于0~1之间; T_j 为每半个月內各风速等级的累计时间(min); j 为风速等级序号,在5~40 m/s內按1 m/s为间隔划分为35个等级,取值1,2...35; V 为植被覆盖度(%); U_j 为第 j 个等级的平均风速(m/s),譬如风速等级为5~6 m/s, $U_1=5.5$ m/s; t_{jmik} 为每个气象站点第 m 年某半月內第 i 天中的第 k 时刻的风速是否属于第 j 个风速等级,如果是, $t_{jmik}=1$,否则, $t_{jmik}=0$; N 为风速资料收集的年份数量, N 取25; m 取值1,2... N ; L 为每半月对应的天数,每月的上半月均取为15 d,其余为下半月取值天数(为13,14,15或16 d); i 取值1,2... L ; k 为1天的24 h中的一个值,取值1,2...24。

沙地(漠)风力侵蚀模型适用于盐碱地、沙地、裸土地、裸岩石砾地,基本形式为:

$$Q_{fs} = 0.018(1-W) \sum_{j=1}^{35} T_j \exp\left\{6.1689 - 0.0743V - \frac{27.9613 \ln(0.893U_j)}{0.893U_j}\right\} \quad (4)$$

式中: Q_{fs} 为每半个月內沙地(漠)风力侵蚀模数[t/(hm²·a)]。

采用 ArcGIS 10.2 软件,计算获得基于 10 m × 10 m 栅格的土壤侵蚀模数,按照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-2007)^[28]进行风力侵蚀强度评价。

(3) 冻融侵蚀强度评价与分析。将下限海拔高程以上区域作为冻融侵蚀评价范围。下限海拔高程计算如下:

$$H = \frac{66.3032 - 0.9197X_1 - 0.1438X_2 + 2.5}{0.005596} - 200 \quad (5)$$

式中: H 为冻融侵蚀评价范围下限海拔高程(m); X_1 为纬度(°); X_2 为经度(°)。

在冻融侵蚀评价范围内,采用多因子综合评价模型计算冻融侵蚀强度综合指数,判定冻融侵蚀强度。冻融侵蚀强度综合指数的计算公式为:

$$FI = \sum_{i=1}^6 W_i I_i \quad (6)$$

式中:FI为冻融侵蚀强度综合指数,无量纲,不同的取值范围对应不同的冻融侵蚀强度; W_i 为年均冻融日循环天数、日均冻融相变水量、年均降水量、坡度、坡向和植被覆盖度等6个评价指标的权重,无量纲; I_i 为6个评价指标不同范围对应的等级值; i 取值1,2...6。分级计算指标赋值标准、评价指标权重值及冻融侵蚀强度分级表详见文献^[20]。

(4) 水土流失面积综合分析。比较每个栅格的水力、风力、冻融侵蚀强度,对于发生冻融侵蚀的栅格,若水力侵蚀或风力侵蚀的强度不小于轻度,则将该栅格的水土流失面积纳入水力侵蚀或风力侵蚀类型。对于发生水力、风力侵蚀的栅格,仅保留侵蚀强度高的侵蚀类型及其强度等级,如侵蚀强度相同,保留水力侵蚀类型及其强度等级。如栅格为单一侵蚀类型,即保留其类型和强度等级。通过综合分析,分别统计得到水力、风力侵蚀中微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈等各级强度侵蚀面积,相关成果经由《中国水土保持公报(2020年)》^[30]发布。与其对应,本文讨论中均未包含冻融侵蚀面积。

(5) 空间叠加分析。采用 ArcGIS 10.2 软件,将土壤侵蚀专题图层,分别与土地利用、植被覆盖度、坡度、高程等专题图层数据进行叠加分析,分别得到基于不同下垫面状况、不同植被盖度、不同坡度、不同海拔高度的土壤侵蚀强度、面积,用于分布特征分析。

3 结果与分析

3.1 不同空间区域土壤侵蚀及其分布特征

3.1.1 不同江河源园区土壤侵蚀及其分布 2020年公园土壤侵蚀面积 2.64×10^4 km²,占土地总面积的21.47%(如图1所示)。其中风力侵蚀面积 2.40×10^4 km²,占土壤侵蚀面积的90.91%;水力侵蚀面积2376 km²,占9.09%;以轻、中度侵蚀为主,其面积占比约80%。按江河源头分,长江源园区土壤侵蚀面积 1.68×10^4 km²,占该区土地总面积的18.60%,占总土壤侵蚀面积的63.63%。风力侵蚀面积 1.50×10^4 km²,约90%;以轻、中度侵蚀为主,占比约75%。另有 0.21×10^4 km²的极强烈侵蚀面积,占比达12%。黄河源园区土壤侵蚀面积9313 km²,占该区土地总面积的48.69%,占总土壤侵蚀面积的35.23%。其中风力侵蚀面积8972 km²,占96.77%,以轻、中度侵蚀为主,占土壤侵蚀面积的88%。澜沧江源园区土壤侵蚀面积341 km²,占该区土地总面积的2.19%,占总土壤侵蚀面积的1.14%;几乎全部为水力侵蚀,以轻度为主,占比98.64%。

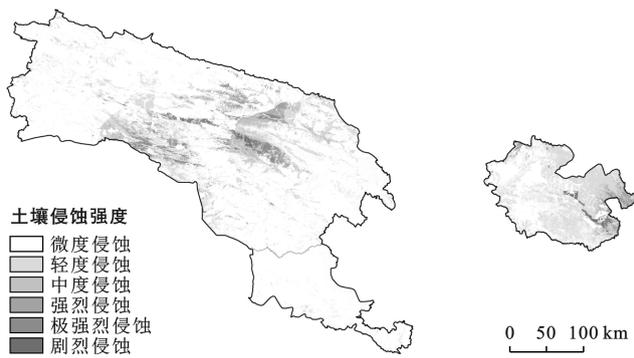


图 1 三江源国家公园 2020 年土壤侵蚀分布

Fig.1 Spatial distribution of soil erosion of Three-River-Source National Park in 2020

分析可知,不同园区土壤侵蚀及其分布存在显著差异。长江源、黄河源园区以风力侵蚀为主,澜沧江源园区以水力侵蚀为主,土壤侵蚀外营力、侵蚀形态和机理机制差异明显。黄河源园区土壤侵蚀面积占土地总面积的比例高于公园的平均值 2 倍多,明显高于长江源和澜沧江源园区,说明黄河源园区是土壤侵蚀分布最广泛的园区。按侵蚀强度分,轻、中度的侵蚀面积比例,澜沧江源园区>黄河源园区>长江源园区,长江源园区的极强烈侵蚀面积占比明显高于其他两个园区,说明长江源园区土壤侵蚀强度高,且局部达到极强烈以上侵蚀强度等级,是土壤侵蚀相对严重

的重点区域。

3.1.2 不同海拔高度区域土壤侵蚀及其分布 按海拔高度分,可划分为季节冻土带(海拔 4 200 m 以下)、岛状及斑状冻土带(海拔 4 200~4 500 m)、连续多年冻土带(海拔 4 500~4 900 m)和 4 900 m 以上的地下冰发育带^[31-32]。

土壤侵蚀主要发生在连续多年冻土带区域,占土壤侵蚀面积的 43.17%,风蚀面积比例达 94.74%,以轻度为主;其次分别是岛状及斑状冻土带(占 35.23%)、地下冰发育带(20.08%),季节冻土带占比仅 1.52%。按侵蚀类型分,水力侵蚀主要发生在地下冰发育带,占 70.83%,其次分别是连续多年冻土带(25.00%);风力侵蚀主要发生在连续多年冻土带,占 45.00%,其次分别是岛状及斑状冻土带(38.33%)、地下冰发育带(15.00%)。长江源园区土壤侵蚀主要发生在连续多年冻土带,占 52.97%,水力侵蚀主要发生在地下冰发育带,占 83.33%,风力侵蚀主要发生在连续多年冻土带,占 57.33%。黄河源园区土壤侵蚀主要发生在岛状及斑状冻土带,占 66.66%,水力侵蚀几乎全部发生在连续多年冻土带,风力侵蚀主要发生在岛状及斑状冻土带,占 68.89%。澜沧江源园区土壤侵蚀主要发生在地下冰发育带,约占 70%(见表 1)。

表 1 不同海拔高度区间土壤侵蚀面积及比例

Table 1 Area and proportion of soil erosion at different elevation zones

江河源 园区	海拔高度 范围/m	土壤侵蚀		水力侵蚀		风力侵蚀	
		面积/10 ⁴ km ²	比例/%	面积/10 ⁴ km ²	比例/%	面积/10 ⁴ km ²	比例/%
公园总体	≤4 200	0.04	1.52	0.00	0.00	0.04	1.67
	4 200~4 500	0.93	35.23	0.01	4.17	0.92	38.33
	4 500~4 900	1.14	43.17	0.06	25.00	1.08	45.00
	>4 900	0.53	20.08	0.17	70.83	0.36	15.00
长江源 园区	≤4 200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 200~4 500	0.30	17.86	0.00	0.00	0.30	20.00
	4 500~4 900	0.89	52.97	0.03	16.67	0.86	57.33
	>4 900	0.49	29.17	0.15	83.33	0.34	22.67
黄河源 园区	≤4 200	0.04	4.30	0.00	0.00	0.04	4.44
	4 200~4 500	0.62	66.66	0.00	0.00	0.62	68.89
	4 500~4 900	0.26	27.96	0.03	100	0.23	25.56
	>4 900	0.01	1.08	0.00	0.00	0.01	1.11
澜沧江源 园区	≤4 200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 200~4 500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 500~4 900	0.01	33.33	0.01	33.33	0.00	0.00
	>4 900	0.02	66.67	0.02	66.67	0.00	0.00

注:表 1 及对应正文中的海拔高度数值范围不包含“~”的前项,包含后项。

分析可知,不同海拔高度区域土壤侵蚀及其分布差异显著。地下冰发育带以下区域土壤侵蚀面积占

比近 80%;水力侵蚀面积的 70.83%分布在地下冰发育带,说明在降雨、径流、冻融作用以及气候变暖等因

素综合影响下,水力侵蚀分布上限海拔高度明显上升;另外,风力侵蚀面积的 85%分布在地下冰发育带以下区域,海拔高度低于水力侵蚀集中分布区域,可能与高海拔地区空气密度小,冻土发育强烈,局部地形地貌特征等因素有关。长江源园区土壤侵蚀多集中分布在连续多年冻土带以上区域,其中水力侵蚀集中分布在地下冰发育带,略高于风力侵蚀分布区。黄河源园区超 70%的土壤侵蚀面积发生在岛状及斑状冻土带及以下的较低海拔区域,水力侵蚀集中分布区域为连续多年冻土带以上,风力侵蚀则集中分布在岛状及斑状冻土带及以下区域,差异明显。澜沧江源园区的土壤侵蚀多集中分布在地下冰发育带区域,水力、风力侵蚀面积的集中分布区海拔高度相近,可能与不同海拔高度的地形以及水力、风力侵蚀内外营力等因素及其综合作用有关,但相对较低海拔地区是土壤侵蚀的集中分布区域,也是预防保护和综合治理的重点关注区域。

3.1.3 不同坡度等级区域土壤侵蚀及其分布 将土壤侵蚀专题图与 DEM 进行叠加,按 6 个坡度等级($\leq 5^\circ, 5^\circ\sim 8^\circ, 8^\circ\sim 15^\circ, 15^\circ\sim 25^\circ, 25^\circ\sim 35^\circ, > 35^\circ$),分析不同坡度等级区域土壤侵蚀特征,结果详见表 2。分析可知,土壤侵蚀主要发生在坡度 5° 及以下的区域,面积占 54.92%,其次是 $8^\circ\sim 15^\circ$ 区域(占 18.94%), $5^\circ\sim 8^\circ$ (占 12.88%)。按侵蚀类型,水力侵蚀主要发生在坡度 $15^\circ\sim 25^\circ$ 区域,面积占 45.82%,其次是 15° 以下区域(33.34%), 25° 及以上区域(20.84%);风力侵蚀主要发生在坡度 5° 及以下区域,面积占比 60.41%,其次是 $5^\circ\sim 15^\circ$ 区域占 31.67%。另长江源园区土壤侵蚀主要发生在 5° 及以下区域,其中水力侵蚀主要发生在 $15^\circ\sim 25^\circ$ 区域,风力侵蚀主要发生在 5° 及以下区域;黄河源园区土壤侵蚀主要发生在 5° 及以下区域,其中水力侵蚀主要发生在 $15^\circ\sim 25^\circ$ 区域,风力侵蚀主要发生在 5° 及以下区域;澜沧江园区土壤侵蚀主要发生在 15° 及以上区域。

表 2 不同坡度等级区域土壤侵蚀面积及其比例

Table 2 Area and proportion of soil erosion at different slopes

江河源 园区	坡度范围	土壤侵蚀		水力侵蚀		风力侵蚀	
		面积/ 10^4 km ²	比例/%	面积/ 10^4 km ²	比例/%	面积/ 10^4 km ²	比例/%
公园 总体	$\leq 5^\circ$	1.45	54.92	0.00	0.00	1.45	60.41
	$5^\circ\sim 8^\circ$	0.34	12.88	0.01	4.17	0.33	13.75
	$8^\circ\sim 15^\circ$	0.50	18.94	0.07	29.17	0.43	17.92
	$15^\circ\sim 25^\circ$	0.26	9.85	0.11	45.82	0.15	6.25
	$25^\circ\sim 35^\circ$	0.07	2.65	0.04	16.67	0.03	1.25
	$> 35^\circ$	0.02	0.76	0.01	4.17	0.01	0.42
长 江 源 园 区	$\leq 5^\circ$	1.05	62.50	0.00	0.00	1.05	70.00
	$5^\circ\sim 8^\circ$	0.17	10.12	0.01	5.56	0.16	10.67
	$8^\circ\sim 15^\circ$	0.26	15.48	0.06	33.33	0.20	13.33
	$15^\circ\sim 25^\circ$	0.16	9.52	0.08	44.44	0.08	5.33
	$25^\circ\sim 35^\circ$	0.04	2.38	0.03	16.67	0.01	0.67
	$> 35^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
黄 河 源 园 区	$\leq 5^\circ$	0.42	45.16	0.00	0.00	0.42	46.66
	$5^\circ\sim 8^\circ$	0.16	17.20	0.00	0.00	0.16	17.78
	$8^\circ\sim 15^\circ$	0.24	25.81	0.01	33.33	0.23	25.56
	$15^\circ\sim 25^\circ$	0.09	9.68	0.02	66.67	0.07	7.78
	$25^\circ\sim 35^\circ$	0.02	2.15	0.00	0.00	0.02	2.22
	$> 35^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
澜 沧 江 源 园 区	$\leq 5^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$5^\circ\sim 8^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$8^\circ\sim 15^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$15^\circ\sim 25^\circ$	0.01	33.33	0.01	33.33	0.00	0.00
	$25^\circ\sim 35^\circ$	0.01	33.34	0.01	33.34	0.00	0.00
	$> 35^\circ$	0.01	33.33	0.01	33.33	0.00	0.00

注:表 2 及对应正文中的坡度数值范围不包含“~”的前项,包含后项。

坡度是土壤侵蚀的主要影响因素,由于公园地貌以高原台地低坡度分布为主,土壤侵蚀分布集中在坡

度 5° 及以下的区域,风力侵蚀中强烈及以上侵蚀强度的面积主要集中分布在 5° 及以下区域,水力侵蚀中强

烈及以上侵蚀强度的面积主要集中在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区域,说明水力侵蚀更易受坡度影响。坡度 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区域是水力侵蚀综合防治的重点,坡度 5° 及以下区域是风力侵蚀综合防治的重点。

3.2 不同地表覆盖状况土壤侵蚀及其分布特征

3.2.1 不同植被覆盖状况土壤侵蚀及其分布 将土壤侵蚀专题图与植被覆盖图进行叠加,按5个覆盖度分级:高覆盖($\geq 75\%$)、中高覆盖($60\%\sim 75\%$)、中覆盖($45\%\sim 60\%$)、中低覆盖($30\%\sim 45\%$)、低覆盖($< 30\%$)。分析不同植被覆盖度土壤侵蚀特征,结果详见表3。分析可知,公园中草地面积比例接近80%,以低覆盖、中低覆盖草地土壤侵蚀为主,占草地土壤侵蚀面积的76.78%,主要为轻度侵蚀;水力侵蚀集中

分布在低覆盖草地上,达72.72%,风力侵蚀主要分布在低覆盖、中低覆盖草地上,达74.74%。长江源园区中草地土壤侵蚀分布以低覆盖、中低覆盖为主,达86.24%,水力、风力侵蚀在低覆盖、中低覆盖草地的比例分别为100%,84.29%。黄河源园区中草地土壤侵蚀分布以低覆盖、中低覆盖为主,占60.24%,水力、风力侵蚀在低覆盖、中低覆盖草地的占比分别为100%,59.26%。澜沧江源园区草地土壤侵蚀均分布在低覆盖、中低覆盖上。植被覆盖是水力、风力侵蚀的主要影响因素,低覆盖、中低覆盖区域是土壤侵蚀的集中分布区和恢复治理的重点区域,保护植被,加强植被建设,提高植被生态质量是预防控制土壤侵蚀的关键措施。

表3 不同植被覆盖状况土壤侵蚀面积及其比例

Table 3 Area and proportion of soil erosion at different grassland coverage

江河源 园区	草地覆盖度	土壤侵蚀		水力侵蚀		风力侵蚀	
		面积/ 10^4 km ²	比例/%	面积/ 10^4 km ²	比例/%	面积/ 10^4 km ²	比例/%
公园 总体	高覆盖	0.05	2.23	0.00	0.00	0.05	2.48
	中高覆盖	0.15	6.70	0.00	0.00	0.15	7.43
	中覆盖	0.32	14.29	0.01	4.55	0.31	15.35
	中低覆盖	0.68	30.36	0.05	22.73	0.63	31.19
	低覆盖	1.04	46.42	0.16	72.72	0.88	43.55
长江 源 园区	高覆盖	0.01	0.72	0.00	0.00	0.01	0.83
	中高覆盖	0.03	2.17	0.00	0.00	0.03	2.48
	中覆盖	0.15	10.87	0.00	0.00	0.15	12.40
	中低覆盖	0.45	32.61	0.03	17.65	0.42	34.71
	低覆盖	0.74	53.63	0.14	82.35	0.60	49.58
黄河 源 园区	高覆盖	0.04	4.82	0.00	0.00	0.04	4.94
	中高覆盖	0.12	14.46	0.00	0.00	0.12	14.81
	中覆盖	0.17	20.48	0.00	0.00	0.17	20.99
	中低覆盖	0.21	25.30	0.00	0.00	0.21	25.93
	低覆盖	0.29	34.94	0.02	100	0.27	33.33
澜沧 江 源 园区	高覆盖	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	中高覆盖	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	中覆盖	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	中低覆盖	0.02	66.67	0.02	66.67	0.00	0.00
	低覆盖	0.01	33.33	0.01	33.33	0.00	0.00

3.2.2 其他地表覆盖状况土壤侵蚀及其分布 三江源国家公园中沙地的土壤侵蚀面积为 $1\ 893$ km²,占土壤侵蚀面积的7.20%。长江源园区中沙地的土壤侵蚀面积占园区土壤侵蚀面积的9.44%,以剧烈侵蚀为主;裸土地水力侵蚀面积占比7.14%,以轻度为主;沙地、裸土地上的风力侵蚀面积占比分别为10.56%,3.58%。黄河源园区中沙地、裸土地的土壤侵蚀占比分别为3.25%,1.88%;水力侵蚀中裸土地占比达21.15%,风力侵蚀在沙地、裸土地上的面积占比达4.52%。澜沧江源园区中裸土地土壤侵蚀面积占比

0.54%,但有1.16%风力侵蚀发生在裸土地上。分析可知,受区域相对恶劣的自然条件影响,裸土地上的水力侵蚀,沙地、裸土地等侵蚀劣地上的风力侵蚀强度普遍偏高,局部达剧烈侵蚀强度等级,问题相对严重,值得重点关注。如何改善立地条件,提高这部分侵蚀劣地的抗侵蚀能力,应组织专题调查,分析研究其成因与机理机制,找到预防与综合治理的途径与技术方案。

3.3 土壤侵蚀综合空间分布特征

综合分析三江源国家公园及不同江河源园区的土壤侵蚀、海拔高度、坡度和植被覆盖度,水力侵蚀、

风力侵蚀集中分布区域存在差异。三江源国家公园水力侵蚀主要分布在 4 900 m 以上地下冰发育带, $8^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的中低覆盖以下草地, 占水力侵蚀面积的 $2/3$ 左右; 风力侵蚀主要集中分布在 4 200~4 900 m, $\leq 5^{\circ}$ 的中覆盖度以下草地, 占风力侵蚀面积的 50%。从不同江河源园区来看, 长江源园区水力侵蚀主要发生在 4 900 m 以上地下冰发育带, $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的低覆盖草地; 风力侵蚀主要发生在海拔 4 200~4 900 m, 5° 及以下区域的中覆盖度以下草地。黄河源园区水力侵蚀主要发生在海拔 4 500~4 900 m 连续多年冻土带, $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的低覆盖草地, 风力侵蚀主要发生在海拔 4 200~4 500 m 岛状及斑状冻土带, 15° 及以下的中覆盖度以下草地。澜沧江水力侵蚀、风力侵蚀都主要发生在 4 900 m 以上的地下冰发育带, 15° 及以上的中低覆盖以下草地。

另值得注意的是, 仍有部分高强度侵蚀发生在高海拔、低覆盖草地上。三江源国家公园强烈及以上水力侵蚀主要分布在 4 900 m 以上地下冰发育带, $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的低覆盖草地上, 占总高强度侵蚀面积的 53%; 强烈及以上风力侵蚀主要分布在 4 500~4 900 m, $\leq 8^{\circ}$ 的中低覆盖及其以下草地。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 三江源国家公园土壤侵蚀成因复杂, 存在水力、风力、冻融及重力等混合侵蚀类型, 以及不同土壤侵蚀类型的交错区, 受高海拔、复杂地形地貌特征、气象水文特征、土壤性质等因素综合影响, 其土壤侵蚀的发生发育机理机制尚不清晰, 规律揭示和研究尚不全面、不系统, 复合侵蚀交互作用研究进展相对缓慢。尤其是近些年来, 受全球气候变暖等影响, 1961—2019 年三江源所在地区 60 a 平均增暖速率为 $0.37^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$, 是全球平均水平的 2 倍以上^[33], 温度升高造成冰川、永久积雪和冻土加速融化, 产生了一些新的土壤侵蚀特征, 如雪线上升造成的融雪性径流侵蚀发育等, 相关的研究尚处于试验和初始阶段。局部人类活动、超载放牧、牲畜践踏与啃食、鼠害以及自然灾害等影响, 更增添了土壤侵蚀发生发育的复杂程度。这些因素的综合作用对土壤侵蚀发生发育、生态系统的稳定性和生态安全的影响研究也有待进一步深化。

(2) 研究结果显示, 长江、黄河、澜沧江源园区土壤侵蚀分布存在显著差异, 不同土地利用类型、地表覆盖状况以及不同坡度和海拔高度区域的水力、风力侵蚀均呈现地带性分布特征。三江源国家公园是国

家重要生态屏障, 国务院明确要求全面加强源头区生态系统保护、系统修复和综合治理。因此, 长江源园区草地风力侵蚀分布广泛, 局地侵蚀强度高, 应保护和治理草地侵蚀, 提高草地生态质量; 黄河源园区沙地、裸土地侵蚀分布范围广、面积大, 应提高林草植被覆盖, 改善生态环境; 澜沧江源园区以草地水力侵蚀为主, 可通过自然修复或人工干预措施加以控制和治理。

(3) 地面定位观测是定量评价土壤侵蚀及其保护治理成效的基础。定量评价是土壤侵蚀研究的必然要求。鉴于三江源国家公园尚未建立起完整科学的土壤侵蚀监测评价体系, 为研究土壤侵蚀规律, 揭示不同因素对土壤侵蚀的作用与影响, 准确评价土壤侵蚀预防保护与综合治理效益, 应按水力、风力、冻融等土壤侵蚀类型, 建立从坡面小区—小流域—区域(水力侵蚀区)、地块—风力侵蚀观测场—区域(风力侵蚀区)以及冻融不同侵蚀类型的地面定位水土保持监测体系, 也可整合不同行业不同部门的地面观测体系, 形成合力, 开展长期、固定、持续的定位观测, 获取完整科学的长序列观测资料, 以弥补遥感监测评价在定量化研究上的不足, 定量评价水土流失及其保护治理成效, 为大尺度区域评价与动态分析奠定基础。

4.2 结论

(1) 据监测, 三江源国家公园土壤侵蚀面积 $2.64 \times 10^4\text{ km}^2$, 黄河源园区是土壤侵蚀分布最广泛的园区, 土壤侵蚀面积占土地面积的比例达 48.69%, 长江源园区土壤侵蚀强度高, 局部达到极强烈以上侵蚀强度等级, 是土壤侵蚀相对严重的重点区域。

(2) 不同海拔高度区域土壤侵蚀及其分布差异显著, 水力侵蚀面积的近 70% 分布在地下冰发育带(海拔 4 900 m 以上), 风力侵蚀面积近 85% 分布在地下冰发育带以下区域(海拔 4 900 m 以下), 明显低于水力侵蚀集中分布区域; 不同江河源园区水力、风力侵蚀的海拔高度分布特征略有差异, 可能与不同海拔高度区域地形地貌特征、空气密度以及内外营力、侵蚀机理机制等因素及其综合作用有关, 相对较低海拔地区是土壤侵蚀的集中分布区域, 也是预防保护和综合治理的重点关注区域。

(3) 三江源国家公园土壤侵蚀分布集中在坡度 5° 及以下的区域, 风力侵蚀中强烈及以上侵蚀强度的面积主要分布在 5° 及以下区域, 水力侵蚀中强烈及以上的侵蚀强度的面积主要分布在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区域, 说明水力侵蚀更易受坡度影响, 也可能与公园地貌以高原台地多低坡度分布等有关, 坡度 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区域是水力侵蚀综合防治的重点, 坡度 5° 及以下区域是风力侵蚀综合防治的重点。

(4) 三江源国家公园中草地面积占近 80%, 土壤侵蚀主要分布在低覆盖、中低覆盖草地上, 占草地土壤侵蚀面积的 76.78%, 是土壤侵蚀的集中分布区和恢复治理的重点区域。保护植被, 加强植被建设, 提高植被生态质量是预防控制该区水土流失的关键措施。同时, 受区域相对恶劣的自然条件影响, 裸土地上的水力侵蚀, 沙地、裸土地侵蚀劣地上的风力侵蚀强度普遍偏高, 局部达剧烈侵蚀强度等级, 值得重点关注。

(5) 三江源国家公园水力侵蚀、风力侵蚀集中分布区域存在差异, 水力侵蚀主要分布在 4 900 m 以上地下冰发育带, $8^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的中低覆盖以下草地, 占水力侵蚀面积的 2/3 左右; 风力侵蚀主要集中分布在 4 200~4 900 m, $\leq 5^{\circ}$ 的中覆盖度以下草地。

[参 考 文 献]

- [1] 中共中央办公厅 国务院办公厅. 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《建立国家公园体制总体方案》[EB/OL] [2017-09-26]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/26/content_5227713.htm.
- [2] 孙鸿烈: 水土流失是各类生态退化的集中反映[J]. 中国水利, 2009(7): 2.
- [3] 陈同德, 焦菊英, 王颖霖, 等. 青藏高原土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 547-564.
- [4] Hou Jian, Wang Huiqing, Fu Bojie, et al. Effects of plant diversity on soil erosion for different vegetation patterns [J]. *Catena*, 2016, 147: 632-637.
- [5] 贺倩, 戴晓爱. 基于 LMDI 模型的三江源区植被对土壤侵蚀变化影响的定量分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(7): 61-67.
- [6] 曹巍, 刘璐璐, 吴丹. 三江源区土壤侵蚀变化及驱动因素分析[J]. 草业学报, 2018, 27(6): 10-22.
- [7] Wang Zhao, Wang Junbang. Changes of soil erosion and possible impacts from ecosystem recovery in the three-river headwaters region, Qinghai, China from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(5): 461-471.
- [8] He Qian, Dai X, Chen Shiqi. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River Headwaters Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(5): 865-886.
- [9] 蒋冲, 高艳妮, 李芬, 等. 1956-2010 年三江源区水土流失状况演变[J]. 环境科学研究, 2017, 30(1): 20-29.
- [10] Gao Min, Xiao Yan, Hu Yunfeng. Evaluation of water yield and soil erosion in the three-river-source region under different land-climate scenarios [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, 11(1): 13.
- [11] 李俊杰, 李勇, 王仰麟, 等. 三江源区东西样带土壤侵蚀的¹³⁷Cs 和²¹⁰Pbex 示踪研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(12): 1452-1459.
- [12] Li Yong, Li Junjie, Are K S, et al. Livestock grazing significantly accelerates soil erosion more than climate change in Qinghai-Tibet Plateau: evidenced from ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex measurements [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 285: 106643.
- [13] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 近 30 年来青海省三江源区草地的土壤侵蚀时空分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(1): 12-21.
- [14] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1240-1247.
- [15] 李国荣, 李希来, 陈文婷, 等. 黄河源区退化草地水土流失规律[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 51-55.
- [16] 李元寿, 王根绪, 王一博, 等. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 616-623.
- [17] Xu Xianli, Zhang Keli, Kong Yaping, et al. Effectiveness of erosion control measures along the Qinghai-Tibet highway, Tibetan Plateau, China [J]. *Transportation Research (Part D: Transport and Environment)*, 2006, 11(4): 302-309.
- [18] 魏梦美, 符素华, 刘宝元. 青藏高原水力侵蚀定量研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(7): 740-752.
- [19] 国务院. 国务院关于同意设立三江源国家公园的批复 [EB/OL]. [2021-10-14]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/14/content_5642440.htm.
- [20] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室. 第一次全国水利普查培训教材之六: 水土保持情况普查[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [21] 史展, 陶和平, 刘淑珍, 等. 基于 GIS 的三江源区冻融侵蚀评价与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 214-221.
- [22] Zhao Tianjie, Zhang Lixin, Jiang Lingmei, et al. A new soil freeze/thaw discriminant algorithm using AM-SR-E passive microwave imagery [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(11): 1704-1716.
- [23] Zhang Lixin, Zhao Tianjie, Jiang Lingmei, et al. Estimate of phase transition water content in freeze-thaw process using microwave radiometer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12): 4248-4255.
- [24] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation[C]// *Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference (Vol. III)*. Tsinghua University Press, Beijing, China, 2002, 2: 15.
- [25] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J]. 中国水土保持, 2013(10): 45-51.

- in dry semi-humid areas [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 218: 211-221.
- [7] 李欣. 宁夏旱作农业覆膜保墒集雨降水高效利用技术模式与成效[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [8] Zhang Dengkui, Wang Qi, Zhou Xujiao, et al. Suitable furrow mulching material for maize and sorghum production with ridge-furrow rainwater harvesting in semi-arid regions of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105928.
- [9] 李萍, 朱清科, 王晶, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区不同规格鱼鳞坑集水效果研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(5): 91-94.
- [10] 宿婷婷, 韩丙芳, 马红彬, 等. 水平沟整地措施对黄土丘陵陵区草原土壤水分动态平衡的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 125-134.
- [11] 邓浩亮, 张恒嘉, 肖让, 等. 陇中旱塬不同覆盖集雨种植方式对春玉米生长特性和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2020, 28(3): 135-141.
- [12] 周旭姣, 王琦, 张登奎, 等. 垄沟集雨种植对土壤水热效应及紫花苜蓿产量的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(11): 60-74.
- [13] Singh S, Angadi S V, Grover K K, et al. Effect of growth stage based irrigation on soil water extraction and water use efficiency of spring safflower cultivars [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 432-439.
- [14] 乔宇鑫, 朱华忠, 邵小明, 等. 基于空间插值数据支持下新疆伊犁地区草地类型判别与分类研究[J]. *草业学报*, 2017, 26(10): 30-45.
- [15] 仲亚婷, 张文太, 黄俊华, 等. 伊犁河谷不同草地类型坡面水土保持效应的模拟降雨试验[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 21-25.
- [16] 周钦, 黄金柏, 周亚明, 等. 城市背景下草地蒸散发及土壤水分变异特性: 以扬州区域性草地植被为例[J]. *节水灌溉*, 2019(3): 22-26.
- [17] Maina M M, Amin M, Aimrun W, et al. Evaluation of different ET_0 calculation methods: a case study in Kano state, Nigeria [J]. *Philipp Agric Scientist*, 2012, 95(4): 378-382.
- [18] 曹孟磊, 肖继东, 陈爱京, 等. 伊犁地区不同草地类型植被指数与气候因子的关系[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(6): 73-80.
- [19] 布热比亚·吐鲁. 伊犁河谷草地微集水措施的截流拦沙效果[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [20] 黄国平, 张文太, 陈景梅, 等. 伊犁河谷次降雨特征对坡面产流产沙的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2021, 56(3): 109-116.
- [21] 王贺亚, 李怀胜, 宋志鹏, 等. 额敏垦区红花品种比较试验[J]. *新疆农垦科技*, 2018, 41(3): 10-12.
- [22] Li Zheng, Zhang Wentai, Aikebaier Y, et al. Sustainable development of arid rangelands and managing rainwater in gullies, Central Asia [J]. *Water*, 2020, 12(9): 2533.
- [23] Bonfim-Silva E M, de Anicésio E C A, de Oliveira J R, et al. Soil water availability on growth and development of safflower plants [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2015, 6(13): 2066-2073.
- [24] Singh S, Angadi S V, Grover K, et al. Drought response and yield formation of spring safflower under different water regimes in the Semiarid Southern High Plains [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163: 354-362.

(上接第 103 页)

- [26] Liu Baoyuan, Xie Yun, Li Zhiguang, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(4): 430-439.
- [27] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 105-110.
- [28] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL190-2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [29] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(8): 875-889.
- [30] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2020年)[R]. 2021-09-30.
- [31] 周幼吾, 郭东信. 我国多年冻土的主要特征[J]. *冰川冻土*, 1982, 4(1): 1-19.
- [32] 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 10-17.
- [33] 靳铮, 游庆龙, 吴芳营, 等. 青藏高原三江源地区近 60 a 气候与极端气候变化特征分析[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1042-1055.