

评估放牧干扰对天山北坡土壤侵蚀及空间特征的影响

胡贵锋^{1,2}, 王新军^{1,2}, 常梦迪^{1,2}, 闫立男^{1,2}, 韩其飞³, 李菊艳⁴, 李永康^{1,2}

(1.新疆农业大学 草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆土壤与植物生态过程实验室, 乌鲁木齐 830052;
3.南京信息工程大学 地理科学学院, 南京 210044; 4.新疆维吾尔自治区水土保持生态环境监测总站, 乌鲁木齐 830000)

摘要:为定量研究天山北坡牧场放牧干扰对土壤侵蚀的影响,基于 Biome-BGC 模型及落叶方程模拟放牧干扰前后生物量,采用“生物量—植被覆盖度”模型估算生物措施因子,结合中国土壤流失方程探索构建放牧干扰对土壤侵蚀定量评估模型,空间显式表达 2019 年天山北坡牧场放牧干扰前后土壤侵蚀空间特征及对土壤侵蚀影响的程度。结果表明:(1) 2019 年天山北坡牧场平均放牧强度为 8.11 羊/hm²;其中昌吉市(12.24 羊/hm²)最高,玛纳斯县(1.87 羊/hm²)最低。(2) 天山北坡放牧干扰前后的土壤侵蚀空间特征,在季节牧场一致,均呈现夏牧场>冬牧场>春秋牧场格局,在县域发生改变但变幅较小。(3) 放牧干扰引起的天山北坡土壤侵蚀模数增幅在季节牧场为春秋牧场 20.65%>夏牧场 15.57%>冬牧场 15.46%;县域为沙湾县 31.93%>阜康市 24.24%>达坂城区 22.04%>乌鲁木齐县 7.56%>玛纳斯县 5.34%>昌吉市 5.30%>呼图壁县 4.37%。放牧干扰是春秋牧场及沙湾县土壤侵蚀的主要原因,自然条件是夏牧场、冬牧场及乌鲁木齐县、昌吉市土壤侵蚀主要原因。研究可为定量表征放牧干扰对土壤侵蚀的影响提供参考,对天山北坡牧区水土保持工作提供一定的科学依据。

关键词:放牧干扰; 土壤侵蚀; Biome-BGC 模型; 落叶方程; CSLE 模型; 天山北坡

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0013-09

Assessment on the Impact of Grazing Disturbance on Spatial Characteristics of Soil Erosion on the Northern Slope of Tianshan Mountains

HU Guifeng^{1,2}, WANG Xinjun^{1,2}, CHANG Mengdi^{1,2}, YAN Linan^{1,2},
HAN Qifei³, LI Juyan⁴, LI Yongkang^{1,2}

(1.College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2.Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China;
3.School of Geographic Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
4.General Station Soil and Water Conservation and Ecological Environment Monitoring of Xinjiang, Urumqi 830000, China)

Abstract: To quantitatively study the impact of grazing disturbance on soil erosion on the northern slope of Tianshan Mountain, the biomass before and after grazing disturbance was simulated based on the Biome-BGC model and the defoliation formulation. The ‘biomass-vegetation coverage’ model was used to estimate biological measure factors. The Chinese soil loss equation was employed to explore the construction of a quantitative assessment model of grazing disturbance on soil erosion, the spatial characteristics of soil erosion before and after grazing disturbance on the northern slope of Tianshan Mountains in 2019 and the degree of impact on soil erosion were spatially and explicitly expressed. The results show that: (1) the average grazing intensity of the pastures on the northern slope of Tianshan Mountain in 2019 was 8.11 sheep/hm², the highest was found in Changji City (12.24 sheep/hm²), and the lowest was found in Manas County (1.87 sheep/hm²); (2) the spatial characteristics of soil erosion before and after grazing disturbance on the pastures on the northern slope of Tianshan Mountains were consistent on seasonal pastures, and the order was summer pasture>winter pasture>spring and autumn pasture; (3) soil erosion modulus on the northern slope of Tianshan Mountain decreased in the order: 20.65% in spring and autumn pastures>15.57% in summer pastures>15.46% in winter pastures on seasonal pastures, and 31.93% in Shawan County>24.24% in Fukang

收稿日期:2020-10-11

修回日期:2020-11-01

资助项目:新疆维吾尔自治区财政专项“天山北坡典型区水土流失与经济发展关系研究”(213031002)

第一作者:胡贵锋(1996—),男,陕西旬阳人,硕士研究生,主要从事水土保持与资源遥感研究。E-mail:1027653876@qq.com

通信作者:王新军(1980—),男,新疆沙湾人,副教授,博士,主要从事景观生态及生态遥感研究。E-mail:wjxj8112@163.com

City>Daban City 22.04%>Urumqi County 7.56%>Manas County 5.34%>Changji City 5.30%>Hutubi County 4.37%。Grazing disturbance is the main influencing factor of soil erosion in spring and autumn pastures in the study area and all pastures in Shawan County. Natural conditions are the main influencing factors of soil erosion in summer and winter pastures in the study area and all pastures in Urumqi County and Changji City. This research can provide the reference for quantitatively characterizing the influence of grazing disturbance on soil erosion, and provide a certain scientific basis for soil and water conservation in the grazing area of the northern slope of Tianshan Mountains.

Keywords: grazing disturbance; soil erosion; Biome-BGC model; defoliation formulation; CSLE model; north slope of Tianshan Mountains

土壤侵蚀是全球最突出的土地退化问题,草地土壤侵蚀占全球 80%^[1]。放牧活动作为人为干扰草地生态系统的主要形式之一,一方面可促进区域经济发展,然而另一方面过度放牧则会引起草地退化、土壤侵蚀等一系列生态环境问题^[2]。我国草地主要集中在生态环境脆弱的干旱半干旱区,人为干扰引起的危害程度深、时间长。放牧活动对土壤侵蚀的影响是区域降水、地形、土壤等自然因子和放牧活动叠加的结果,因此从放牧活动对土壤侵蚀影响的机理过程出发,定量评估放牧活动对区域土壤侵蚀的影响,明确牧区土壤侵蚀空间特征,对干旱区草地牧场水土保持工作具有重要意义。

目前,关于放牧和草地土壤侵蚀研究颇多,可分为定性或定量描述牧区土壤侵蚀现状两个方向^[3-4],样点和区域评估两个尺度^[5-6],利用侵蚀产沙试验等手段探明放牧干扰下的侵蚀产沙特征、对放牧活动和土壤侵蚀的中间因子进行分析(如土壤理化性质、生物量、土壤可蚀性因子等)及利用经验模型分析三大层次^[7-9],区域主要集中在内蒙古草原和青藏高原高寒草原^[10-11]。已有研究多通过放牧强度与区域土壤侵蚀特征的相关性分析来表征放牧对土壤侵蚀的影响,仅能评估放牧叠加在自然状态之上的土壤侵蚀特征,未从机理过程模拟放牧对土壤侵蚀的影响^[12-13],难以评估放牧对土壤侵蚀影响的程度。因此需要一种方法剥离自然条件下的土壤侵蚀,定量评估放牧活动对土壤侵蚀的影响,并阐明牧区的土壤侵蚀空间特征,为制定牧区合理放牧强度和水土保持工作提供理论依据。放牧活动对植被的采食及引起土壤物理性状的变化使草地生物量变化显著,因此草地生物量可以作为放牧活动对土壤侵蚀影响的表征因子^[14-15]。陆地生态系统过程模型在研究人类干扰对生态系统结构与功能影响中普遍使用,其中 Biome-BGC 模型可以用来估算陆地生态系统碳、氮、水储存及通量^[16-18],已得到广泛应用^[19-20];落叶方程是评估牲畜对草地生物量采食量的有效经验模型^[21],将二者结

合进而探讨放牧干扰对草地生物量影响研究已成为一种趋势^[22-23];中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)是适用于我国土壤侵蚀评估研究的经验模型^[24-25],生物措施因子(B)与植被覆盖度(f)、生物量联系紧密^[9]。基于以上理论,从“放牧干扰—生物量—土壤侵蚀”机理链条出发定量评估放牧活动对土壤侵蚀的影响成为可能。

天山北坡中段处于亚欧大陆干旱区中部,其生态系统为陆地生态系统最脆弱组成部分之一^[26]。受降水和地形影响,天山北坡土壤侵蚀情况严峻,且山地草原放牧活动使得土壤侵蚀情况日益加剧^[27],因此,基于 Biome-BGC 模型、落叶方程及 CSLE 模型,从“生物量—放牧采食—生物措施因子—土壤侵蚀”机理链条出发,定量表征放牧干扰对土壤侵蚀的影响,阐明天山北坡放牧干扰前后土壤侵蚀空间特征,可为天山北坡牧场的放牧规划和水土保持工作提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区天山北坡中段(84°83′—88°97′ E, 42°92′—44°34′ N)。海拔 450~5 300 m,地形以山地为主。属中温带大陆性气候,7 月份均温 24.4℃,1 月份均温 -18.4℃,年平均气温约 2.6℃,蒸发量 1 000~2 000 mm;年均降水量 173.3 mm,6—8 月降水量约占全年 68%,降水量呈逐年增加趋势。土地利用方式主要为草地和林地,土壤类型有棕钙土、栗钙土、黑钙土、灰褐土、黑毡土、草毡土等。人类干扰主要为轮牧制度的草场放牧,海拔自低至高依次为春秋牧场、冬牧场和夏牧场三大季节牧场,主要放牧牲畜有羊、牛、马、骆驼和驴等。

1.2 数据获取

(1) 气象数据。从国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)获取研究区内乌鲁木齐牧试站、天池站、呼图壁站、达坂城站 2019 年逐日气象观测数据,基于其中最高温、最低温和降水日值数据,利用 MT-

CLIM 山地气候模拟器^[16-18,28]插值获取各模拟点的 Biome-BGC 模型气象输入数据。

(2) 生理生态参数数据。Biome-BGC 模型模拟采用 C₃ 草地植被生理生态参数,其中针对天山北坡植被修正的参数均通过已发表文献获取^[21,23,29],其他参数均采用 White 等^[16]针对 C₃ 草地校正的值。

(3) 样点土壤理化性质与植被特征。按照系统分层采样法^[9]在研究区设计 84 个样点进行土壤采样,并测量记录样点内植被株高、单位面积地上生物量等信息。使用油浴加热重铬酸钾氧化容量法测定土壤有机质含量,筛分法和比重计法测定土壤质地^[9],数码相机照相法获取草地植被盖度。

(4) 放牧数据。通过统计年鉴资料,遴选牧区乡镇放牧牲畜数量,转化为标准羊数据作为放牧强度(按照全国畜牧业标准化技术委员会 2015 年《天然草地合理载畜量的计算》标准^[30]结合研究区实际情况转换)。牧区乡镇根据主要土地利用类型和主要从业人口类型划分。

(5) 空间数据。基于新疆维吾尔自治区测绘局 1:10 000 地形图处理得到空间分辨率为 10 m 的数字高程模型数据(DEM);基于实地调查和遥感解译绘制研究区季节牧场范围数据。

1.3 研究方法

本文基于多种模型方法(Biome-BGC 模型、落叶方程、CSLE 模型等),分析放牧干扰对土壤侵蚀及其空间特征的影响。

1.3.1 Biome-BGC 模型 Biome-BGC 模型^[16-18]是用来估算陆地生态系统碳、氮、水储存及通量的基于过程的生态系统模型。可通过输入研究区气象数据、生理生态参数和站点参数,模拟总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)和净生态系统碳交换量(NEE)等。气象数据:日最高和最低温度、日平均温度、日降雨量、日平均水汽压差、日平均短波辐射通量密度和昼长;生理生态参数:物候、根/冠比和比叶面积等;站点参数:纬度、高程、土壤质地等。基于 Biome-BGC 4.2 版本模型(NTSG: <http://www.ntsg.umt.edu/project/biome-bgc.php>),设置草地类型为 C₃ 草地,输入各样点的气象、生理生态参数和站点数据,模拟各样点草地 NPP。以 0.45 转化比^[31],将 NPP(gC/m²)和生物量(g/m²)进行转化。

1.3.2 落叶方程 由于 Biome-BGC 模型仅能估算自然状态下生物量,无法模拟放牧干扰对生物量的影响,因此引入落叶方程^[21]。落叶方程由 Seligman 等建立,可通过输入放牧强度、初始生物量、放牧效率等参数,得出牲畜采食的生物量。采用落叶方程模拟放

牧干扰对生物量的影响,公式为:

$$D_r = G_e S_r (C_{\text{leaf}} - (C_{\text{leaf}})_U) \quad (0 < D_r < S_r D_x) \quad (1)$$

式中: D_r 为落叶速率[kg/(hm²·d)]; G_e 为牲畜放牧效率[hm²/(d·羊)]; S_r 为放牧强度[羊/(d·hm²)]; C_{leaf} 为初始生物量; $(C_{\text{leaf}})_U$ 为牲畜无法采食的生物量(kg/hm²); D_x 为牲畜饱和消费速率(kgC/m²)。

1.3.3 生物量—植被覆盖度模型构建 基于 2019 年夏季天山北坡牧场 84 个样点,每个样点 3 个重复样方,获取的实测生物量(BI)、植被覆盖度(f)、牧草平均株高(H)数据,按照“ $BI = f \times H$ ”的模型理论,利用 SPSS 软件将 $f \times H$ 得到的“植被体积(X)”和“BI”进行模型回归,模型 R^2 达到 0.702 3, $n = 186$,公式如下:

$$BI = 11.238 X^{0.395} \quad (2)$$

$$f = BI^{2.53} / 5635.9 \quad (BI > 188, f = 100\%; BI = 0, f = 0) \quad (3)$$

式中:BI 为生物量(g/m²); X 为样方内植被体积; f 为植被覆盖度(%)。

将式(2)中株高 H 取平均值得到式(3),计算得出放牧干扰前后植被覆盖度 f_{or} 和 f_{gr} 。

1.3.4 CSLE 模型 CSLE 模型是刘宝元参考 USLE 模型提出适用于我国的土壤流失评价模型^[32],公式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (4)$$

式中: A 为单位面积年均土壤流失量[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; S 为坡度因子; B 为生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。其中 L, S, B, E, T 因子为无量纲, B, E, T 因子值介于 0~1。

降雨侵蚀力因子(R):利用日雨量模型^[33],计算近 18 a 年均降雨侵蚀力,采用 Kriging 插值法得到降雨侵蚀力图(图 1A);土壤可蚀性因子(K):考虑放牧对土壤渗透性和土壤结构的影响,采用修正诺漠法^[34]估算样点土壤可蚀性值,使用 Kriging 插值法结合土壤类型空间分布图得到土壤可蚀性图(图 1B);坡长坡度因子(LS):采用分段坡度坡长因子公式^[35],结合刘宝元^[36-37]、McCool^[38]等的研究成果计算得出坡度坡长因子图(图 1C)。研究区内主要为天然草场放牧,无相关工程措施和耕作措施,因此工程措施因子(E)和耕作措施因子(T)赋值为 1。生物措施因子(B):使用蔡崇法等^[39]的方法,基于式(5)得出的放牧干扰前后植被覆盖度估算放牧干扰前后 B 值,使用 Kriging 插值法得到放牧干扰前后生物措施因子(图 1D、E),公式如下:

$$B = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0 & f > 78.3\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: B 为生物措施因子; f 为植被覆盖度(%)。

北坡季节牧场土壤侵蚀模数(图 1F,G)和土壤侵蚀强度图(图 1H,I)。

基于 CSLE 模型理论, 利用栅格计算器得出天山

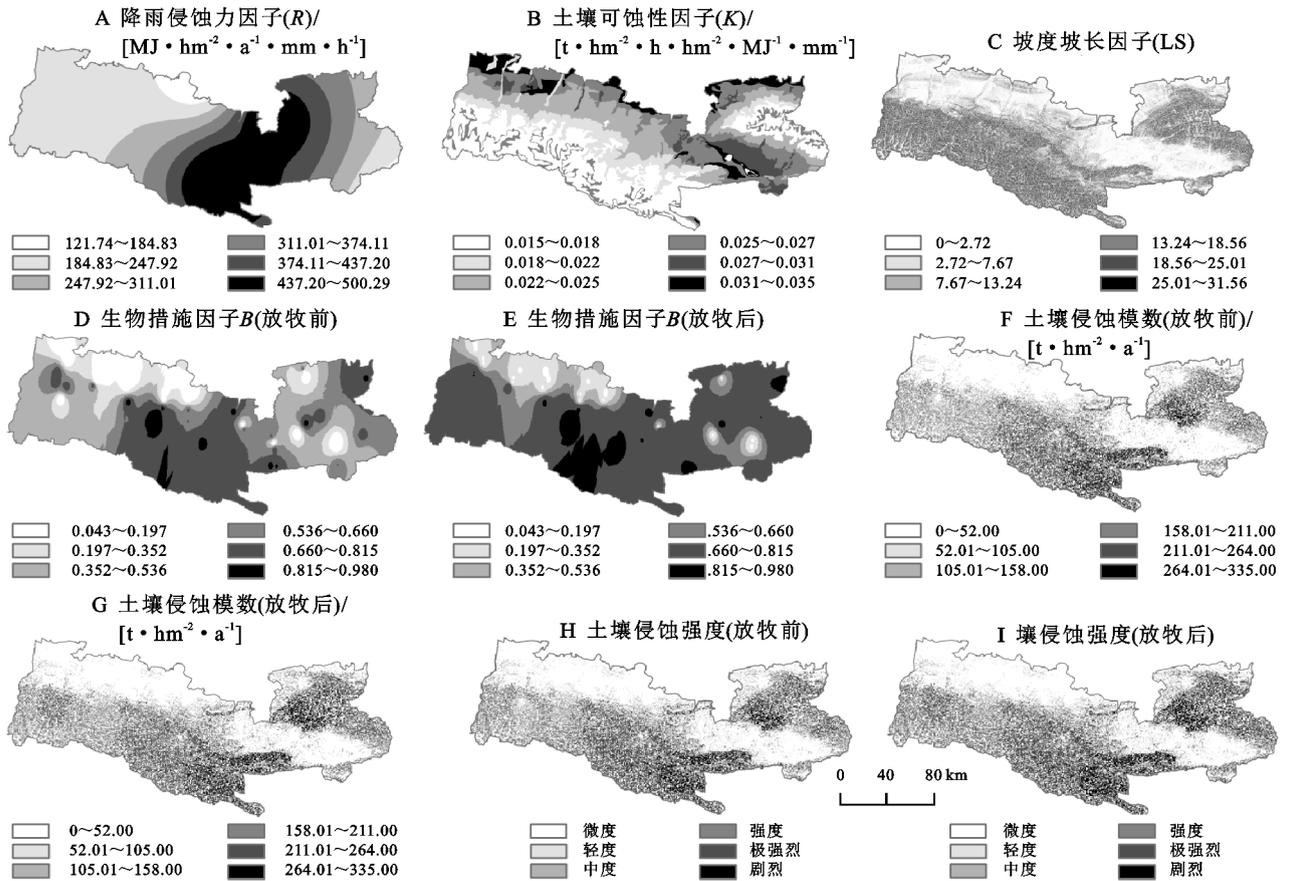


图 1 天山北坡牧场 CSLE 因子空间特征

2 结果与分析

2.1 Biome-BGC 模型验证

将 Biome-BGC 模型模拟草地生物量值与实测草地生物量值进行对比, R^2 , RMSE 分别为 0.85, 6.169 $[gC/(m^2 \cdot a)]$, 表明 Biome-BGC 模型能够较好模拟天山北坡草地生物量(图 2)。

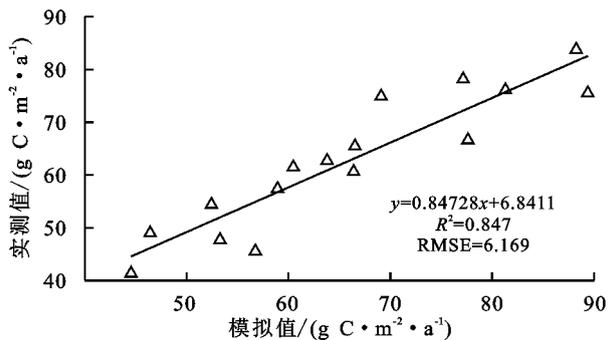


图 2 生物量实测值与模拟值对比

2.2 天山北坡牧场放牧干扰前后土壤侵蚀空间特征

2.2.1 天山北坡牧场放牧强度空间特征 2019 年天山北坡牧场平均放牧强度 8.11 羊/hm²; 季节牧场放牧强度冬牧场 > 夏牧场 > 春秋牧场; 县域放牧强度昌吉市 > 阜康市 > 沙湾县 > 呼图壁县 > 达坂城区 > 乌

鲁木齐县 > 玛纳斯县; 县域中沙湾县、呼图壁县、昌吉市及阜康市超过县域平均放牧强度(表 1)。

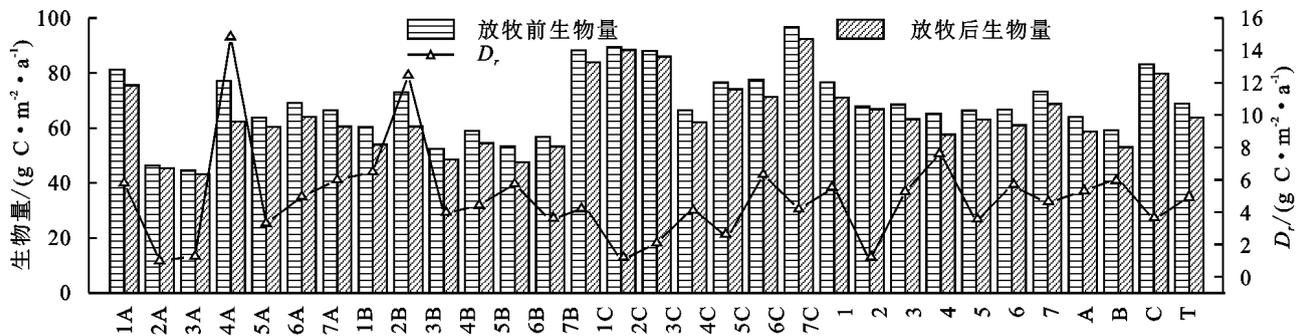
表 1 天山北坡牧场 2019 年放牧强度

地区	羊/hm ²			县域
	春秋牧场	冬牧场	夏牧场	
沙湾县	5.30	12.08	7.77	8.38
玛纳斯县	1.23	—	2.50	1.87
呼图壁县	2.57	18.81	3.38	8.25
昌吉市	7.10	8.54	21.08	12.24
乌鲁木齐市	3.46	8.49	5.81	5.92
阜康市	8.93	12.36	7.94	9.74
达坂城区	4.65	6.99	10.02	7.22
天山北坡	4.75	11.21	8.36	8.11

2.2.2 放牧干扰前后生物量空间特征 天山北坡牧场放牧干扰前和干扰后的生物量空间特征, 在季节牧场未发生改变, 均呈现出春秋牧场 > 夏牧场 > 冬牧场的特征。此特征可能由季节牧场的海拔和降水共同导致: 一方面, 季节牧场海拔自高至低依次为夏牧场、冬牧场、春秋牧场, 低海拔牧场可为草地植被生长提供更充足的热量条件, 因此春秋牧场生物量最大; 另一方面中山带以下降水量随海拔升高而增加^[23], 降

水量上夏牧场大于冬牧场,因此在水分和温度双重作用下,夏牧场和冬牧场生物量接近。天山北坡牧场放牧干扰前和干扰后的生物量空间特征,在县域发生改变,但变幅较小,放牧干扰前呈现出沙湾县>达坂城区>玛纳斯县>阜康市>乌鲁木齐县>呼图壁县>昌吉市的特征,而放牧干扰后转变为沙湾县>达坂城区>玛纳斯县>呼图壁县>乌鲁木齐县>阜康市>昌吉市的特征,主要变化为阜康市放牧干扰后转变为低于呼图壁县(图3)。

2.2.3 放牧干扰前后生物措施因子空间特征 天山北坡牧场放牧干扰前和干扰后的生物措施因子空间特征,在季节牧场未发生改变,均呈冬牧场>夏牧场>春秋牧场的格局;在县域发生改变,但变幅较小,放牧干扰前呈现出昌吉市>阜康市>乌鲁木齐县>呼图壁县>达坂城区>沙湾县>玛纳斯县的特征,而放牧干扰后转变为昌吉市>阜康市>乌鲁木齐县>达坂城区>呼图壁县>沙湾县>玛纳斯县的特征,主要变化为呼图壁县放牧干扰后转变为低于达坂城区(表2)。



注:1 沙湾县;2 玛纳斯县;3 呼图壁县;4 昌吉市;5 乌鲁木齐县;6 阜康市;7 达坂城区;A 夏牧场;B 冬牧场;C 春秋牧场;T 天山北坡。下同。

图3 天山北坡牧场放牧干扰前后生物量空间特征

表2 天山北坡牧场放牧干扰前后生物措施因子B值

地区	放牧前				放牧后				B 增量			
	春秋牧场	冬牧场	夏牧场	县域	春秋牧场	冬牧场	夏牧场	县域	春秋牧场	冬牧场	夏牧场	县域
沙湾县	0.04	0.78	0.58	0.47	0.04	0.82	0.65	0.50	0.46	0.04	0.07	0.04
玛纳斯县	0.04	—	0.87	0.46	0.04	—	0.88	0.46	0.42	—	0.01	0.01
呼图壁县	0.04	0.71	0.89	0.55	0.04	0.78	0.90	0.57	0.53	0.07	0.01	0.03
昌吉市	0.74	0.83	0.69	0.75	0.77	0.86	0.77	0.80	0.06	0.03	0.08	0.04
乌鲁木齐县	0.37	0.79	0.76	0.64	0.54	0.82	0.78	0.71	0.34	0.03	0.02	0.07
阜康市	0.44	0.83	0.73	0.67	0.59	0.87	0.75	0.74	0.30	0.04	0.02	0.07
达坂城区	0.04	0.80	0.75	0.53	0.20	0.83	0.78	0.60	0.56	0.03	0.03	0.07
天山北坡	0.24	0.79	0.75	0.58	0.32	0.83	0.79	0.63	0.38	0.04	0.04	0.05

2.2.4 放牧干扰前后土壤侵蚀空间特征 天山北坡牧场放牧干扰前和干扰后的土壤侵蚀模数空间特征,在季节牧场未发生改变,均呈夏牧场>冬牧场>春秋牧场特征;在县域发生改变,但变幅较小,放牧干扰前呈乌鲁木齐县>昌吉市>阜康市>达

坂城区>呼图壁县>玛纳斯县>沙湾县特征,而放牧干扰后转变为乌鲁木齐县>阜康市>达坂城区>昌吉市>呼图壁县>玛纳斯县>沙湾县特征,主要变化为昌吉市放牧干扰后转变为低于阜康市和达坂城区(图4)。

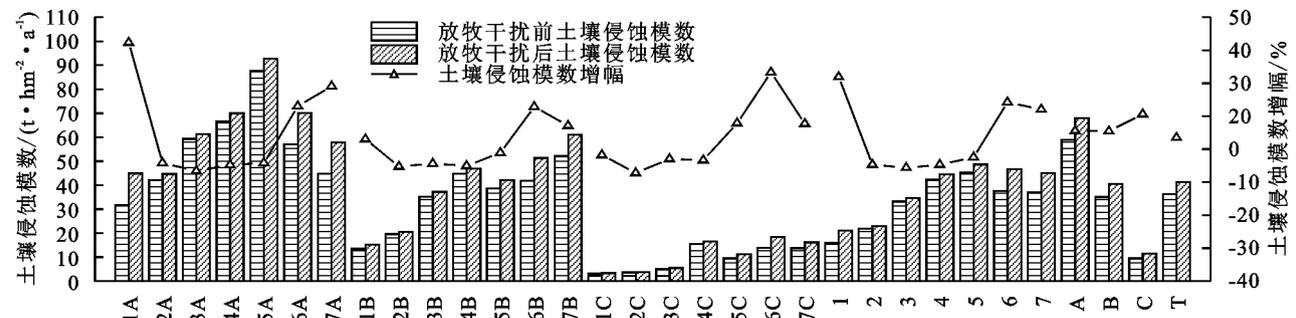


图4 天山北坡牧场放牧干扰前后土壤侵蚀模数及增幅空间特征

2.3 放牧干扰对天山北坡牧场土壤侵蚀影响特征

2.3.1 放牧干扰对生物量影响特征 以落叶速率

(D_a)定量表征放牧干扰对草地生物量的采食量。

2019年天山北坡牧场生物量在放牧干扰下平均减少

4.75 [gC/(m²·a)]; 季节牧场放牧干扰引起的生物量减少量, 呈现出冬牧场 9.09 [gC/(m²·a)] > 夏牧场 5.31 [gC/(m²·a)] > 春秋牧场 3.51 [gC/(m²·a)] 的特征; 县域放牧干扰引起的生物量减少量, 呈现出昌吉市 7.66 [gC/(m²·a)] > 阜康市 5.68 [gC/(m²·a)] > 沙湾县 5.53 [gC/(m²·a)] > 呼图壁县 5.28 [gC/(m²·a)] > 达坂城区 4.56 [gC/(m²·a)] > 乌鲁木齐县 3.39 [gC/(m²·a)] > 玛纳斯县 1.00 [gC/(m²·a)] 的特征 (图 3)。将放牧强度和 D_r 进行相关分析, 天山北坡牧场采食生物量随放牧强度增大而增大, 相关系数高 ($r=0.96$), 表明随放牧强度增大, 天山北坡牧场生物量呈线性降低 (图 5)。

2.3.2 放牧干扰对生物措施因子影响特征 使用生物措施因子 B 值增量定量表征放牧干扰对生物措施因子的影响。2019 年天山北坡牧场生物措施因子在放牧干扰下平均增加 0.05; 季节牧场放牧干扰引起的生物措施因子增加量, 呈现出春秋牧场 0.383 > 冬牧场 0.038 > 夏牧场 0.035 特征; 县域放牧干扰引起的

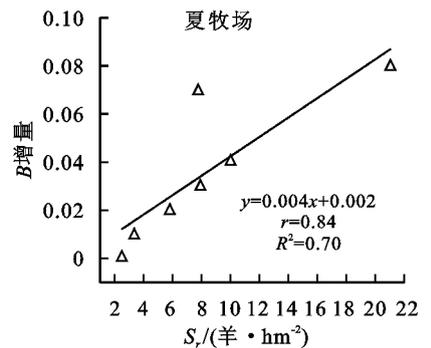
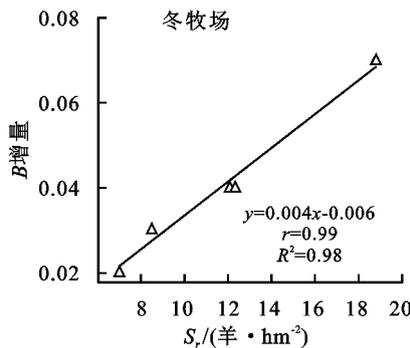
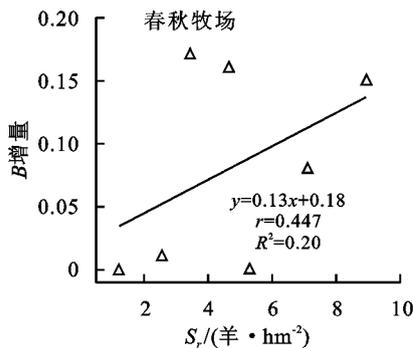


图 6 天山北坡牧场放牧强度对生物措施因子影响特征

2.3.3 放牧干扰对土壤侵蚀影响特征 2019 年天山北坡牧场土壤侵蚀强度在放牧干扰下, 总体呈现出从微度、轻度、中度、强烈向极强烈和剧烈转移趋势, 其中极强烈增加 2.57%, 剧烈增加 1.4% (图 1H, I)。

以放牧干扰下土壤侵蚀模数的增幅定量表征放牧干扰对土壤侵蚀的影响。2019 年天山北坡牧场土壤侵蚀模数在放牧干扰下平均增幅为 13.5%; 季节牧场放牧干扰引起的土壤侵蚀模数增幅, 呈现出春秋牧场 20.65% > 夏牧场 15.57% > 冬牧场 15.46% 特征; 县域放牧干扰引起的土壤侵蚀模数增幅, 呈现出沙湾县 31.93% > 阜康市 24.24% > 达坂城区 22.04% > 乌鲁木齐县 7.56% > 玛纳斯县 5.34% > 昌吉市 5.30% > 呼图壁县 4.37% 特征 (图 4)。

利用放牧干扰下的土壤侵蚀模数增幅和放牧强度间关系, 区分季节牧场土壤侵蚀的主要影响因素为“自然条件”或“放牧干扰”。春秋牧场土壤侵蚀模数增幅随放牧强度增大而增大, r 为 0.66, 而夏牧场和冬牧场随着

生物措施因子增加量, 呈现出达坂城区 0.073 > 乌鲁木齐县 0.072 > 阜康市 0.070 > 昌吉市 0.045 > 沙湾县 0.038 > 呼图壁县 0.028 > 玛纳斯县 0.009 特征 (表 2)。将放牧强度和 B 值增量进行相关分析, 可以看出 B 增量整体随放牧强度增大而增大, 季节牧场放牧强度和 B 值增量间相关性冬牧场 > 夏牧场 > 春秋牧场, 表明放牧干扰是冬牧场和夏牧场生物措施因子值增大的主要影响因素, 而对春秋牧场生物措施因子影响小 (图 6)。

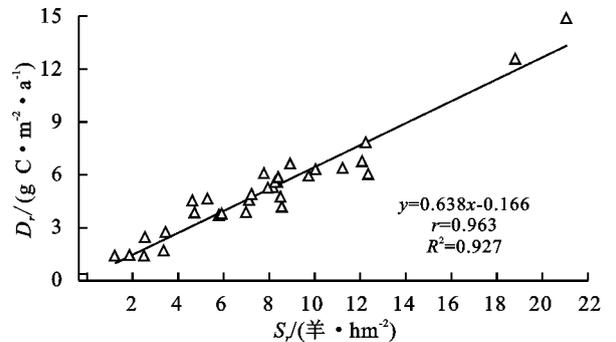


图 5 天山北坡牧场放牧强度对落叶速率影响特征

放牧强度的增大土壤侵蚀模数增幅不明显, r 为 -0.07, 表明放牧干扰是春秋牧场土壤侵蚀模数增大的主要原因, 而对夏牧场和冬牧场影响不显著 (图 7)。

利用放牧干扰前和干扰后的土壤侵蚀模数及土壤侵蚀模数增幅 3 个因子间的组合特征, 区分县域土壤侵蚀的主要影响因素为“自然条件”或“放牧干扰”。放牧干扰前土壤侵蚀模数高于平均值表明其自然状态下土壤侵蚀就较为严峻, 低于平均值表明其自然状态下较少存在土壤侵蚀; 土壤侵蚀模数增幅高于平均值, 表明放牧干扰引起的土壤侵蚀增加量相对于自然状态下的土壤侵蚀量依然较大, 因此表明放牧干扰对土壤侵蚀有明显影响, 而低于平均值表明放牧干扰引起的土壤侵蚀增加量相对于自然状态下的土壤侵蚀量较小, 因此放牧干扰对其土壤侵蚀影响不显著。综上所述, 沙湾县组合特征为“低低高”, 表明其土壤侵蚀主要受放牧干扰影响; 玛纳斯县和呼图壁县组合特征为“低低低”, 表明其土壤侵蚀受二者影响均较小;

昌吉市和乌鲁木齐县组合特征为“高高低”,表明其土壤侵蚀主要受自然条件影响;阜康市和达坂城区组合

特征为“高高高”,表明放牧干扰加剧了自然条件下的土壤侵蚀(图8)。

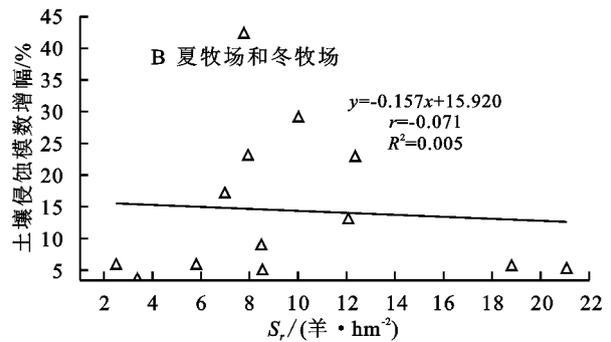
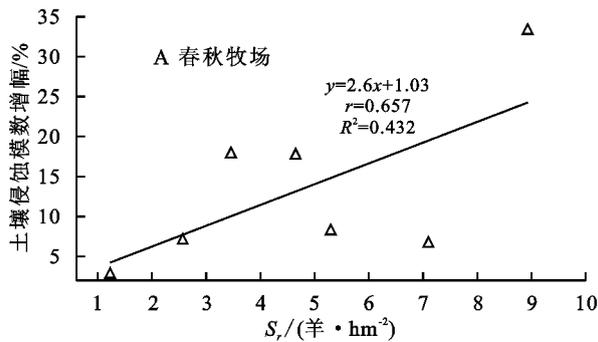


图7 天山北坡牧场放牧强度对土壤侵蚀模数影响特征

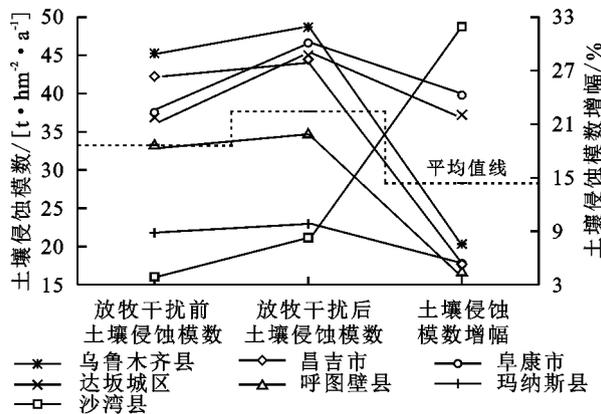


图8 天山北坡牧场县域土壤侵蚀特征

3 讨论

3.1 不确定性分析

模拟点的 Biome-BGC 模型气象数据是基于站点数据利用 MT-CLIM 插值所得,由于气象站点稀疏及与模拟点海拔相差较大,导致插值获取的模拟点的气象数据与真实值间存在偏差^[23];Biome-BGC 模型生理生态参数中仅物候、根冠比和比叶面积校正至研究区值,其余采用 C₃ 草地模型参数,与研究区真实参数尚有差异;后续研究可从获取精确气象数据、生理生态参数本地校正来提高 Biome-BGC 模型模拟精度。

落叶方程假设草地在垂直和水平方向上均匀,草地物种可食性均一,可能会高估动物采食量^[40]。由于缺少样方内各植被物种高度数据,构建“生物量—植被覆盖度模型”时,采取了样方内平均高度,未分物种构建模型,因此一定程度上降低了模型精度。放牧践踏作用对土壤侵蚀的影响尚有争论,林慧龙等学者认为放牧干扰会降低土壤可蚀性因子,从而加剧土壤侵蚀^[8],也有学者认为放牧践踏主要为影响土壤养分、水分进而影响生物量^[15],后续研究应结合践踏等因素探讨放牧干扰对土壤侵蚀的影响。

3.2 放牧干扰对生物量及土壤侵蚀的影响

利用 Biome-BGC 模型模拟天山北坡牧场平均生

物量为 69.18 [gC/(m²·a)],受放牧干扰影响降低至 63.87 [gC/(m²·a)];天山北坡牧场平均生物量呈现出春秋牧场>冬牧场和夏牧场趋势。此结果和周德成等^[23]结果相一致。

天然放牧草地较少存在工程措施和耕作措施,因此生物措施因子为 CSLE 模型中主要受人为干扰影响的因子^[41],是放牧干扰对土壤侵蚀影响的核心链节点。当前生物措施因子值通常利用植被覆盖度推算得到,如本研究采用蔡崇法等利用植被覆盖度计算生物措施因子值公式计算^[39],其无法直接从放牧干扰影响的生物量因素得出生物措施因子值,而是经过植被覆盖度的多级转换所得,因此建立适用于草地的“生物量—生物措施因子”模型对牧区土壤侵蚀研究至关重要。

天山北坡牧场平均土壤侵蚀模数为 41.25 t/(hm²·a),土壤侵蚀强度整体以微度为主,但极强烈以上占比高,极强烈和剧烈主要出现在夏牧场和乌鲁木齐县、昌吉市、阜康市,均为高海拔地势陡峭和东部降水量高区域,这与已有研究吻合^[9]。“放牧干扰”主要影响春秋牧场及沙湾县土壤侵蚀,应制定合理放牧强度,控制放牧干扰对土壤侵蚀的影响;夏牧场、冬牧场及县域中乌鲁木齐县和昌吉市土壤侵蚀主要由“自然条件”导致,应着力减轻自然条件下的土壤侵蚀,并禁牧以杜绝土壤侵蚀的加剧。

4 结论

(1) Biome-BGC 模型能够较好模拟天山北坡牧场生物量,模拟值和实测值间 R^2 达 0.85, RMSE 为 6.169 gC/(m²·a)。2019 年天山北坡牧场平均放牧强度为 8.11 羊/hm²;县域放牧强度:昌吉市>阜康市>沙湾县>呼图壁县>达坂城区>乌鲁木齐县>玛纳斯县。

(2) 2019 年天山北坡牧场在放牧干扰下,生物量降低、生物措施因子值增大、土壤侵蚀模数升高。

放牧干扰前和放牧干扰后三者的空间特征在季节牧场均未发生改变,而在县域均发生改变。其中土壤侵蚀模数的空间特征在季节牧场均为夏牧场>冬牧场>春秋牧场;而在县域干扰前为乌鲁木齐县>昌吉市>阜康市>达坂城区>呼图壁县>玛纳斯县>沙湾县,干扰后转变为乌鲁木齐县>阜康市>达坂城区>昌吉市>呼图壁县>玛纳斯县>沙湾县。

(3) 2019 年天山北坡牧场在放牧干扰下,土壤侵蚀模数平均增幅为 13.5%,季节牧场增幅:春秋牧场 20.65%>夏牧场 15.57%>冬牧场 15.46%;县域增幅:沙湾县 31.93%>阜康市 24.24%>达坂城区 22.04%>乌鲁木齐县 7.56%>玛纳斯县 5.34%>昌吉市 5.30%>呼图壁县 4.37%。2019 年天山北坡春秋牧场及沙湾县土壤侵蚀的主要原因为放牧干扰,夏牧场、冬牧场及乌鲁木齐县、昌吉市土壤侵蚀的主要原因为自然条件。

参考文献:

- [1] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. *Science*, 1995,267(5201):1117-1123.
- [2] 杨思维,张德罡,牛钰杰,等.短期放牧对高寒草甸表层土壤入渗和水分保持能力的影响[J].*水土保持学报*, 2016,30(4):96-101.
- [3] Belsky A J, Blumenthal D M. Effects of livestock grazing on stand dynamics and soils in upland forests of the interior west; efectos del pastoreo sobre la dinámica de árboles y suelos en bosques en el altiplano del occidente interior [J]. *Conservation Biology*, 1997,11(2):315-327.
- [4] 张肖林.渭北黄土高原合理放牧对退耕草地土壤呼吸和侵蚀的影响[D].北京:中国农业科学院,2016.
- [5] 郭建英,董智,李锦荣,等.放牧强度对荒漠草原土壤物理性质及其侵蚀产沙的影响[J].*中国草地学报*,2019,41(3):74-82.
- [6] 兰瑞君,郭建英,尹忠东,等.不同放牧强度下土壤侵蚀对典型草原土壤有机碳的影响[J].*水土保持学报*,2017,31(4):172-177.
- [7] Barger N N, Herrick J E, Van Zee J, et al. Impacts of biological soil crust disturbance and composition on C and N loss from water erosion [J]. *Biogeochemistry*, 2006,77(2):247-263.
- [8] 林慧龙,王苗苗,李学玲,等.在模拟降水和践踏处理复合作用下长芒草典型草原土壤可蚀性研究[J].*草业学报*,2010,19(3):76-87.
- [9] 卢刚.基于 CSLE 模型的天山北坡西白杨沟流域土壤侵蚀定量评价[J].*水土保持通报*,2019,39(2):124-130.
- [10] 李新凯,卜崇峰,李宜坪,等.放牧干扰背景下藓结皮对毛乌素沙地土壤水分与风蚀的影响[J].*水土保持研究*,2018,25(6):22-28.
- [11] 薛冉,郭雅婧,苗福泓,等.短期放牧对高寒草甸土壤水稳性团聚体构成及稳定性的影响[J].*水土保持通报*, 2014,34(3):82-86,91.
- [12] Hoffmann C, Funke R, Wieland R, et al. Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilingele grassland, Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007,72(5):792-804.
- [13] 林慧龙,龙瑞军,任继周.放牧侵蚀研究回顾与展望[J].*生态学杂志*,2008,27(12):2222-2227.
- [14] 许志信,赵萌莉.过度放牧对草原土壤侵蚀的影响[J].*中国草地学报*,2001,23(6):59-63.
- [15] 杜宝红,高翠萍,哈达朝鲁.不同放牧强度对锡林郭勒典型草原生产力及碳储量的影响[J].*水土保持研究*, 2018,25(1):139-146,152.
- [16] White M A, Thornton P E, Running S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls [R]. *Earth Interaction*, 2000.
- [17] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002,113(1/4):185-222.
- [18] Wang Q X, Masataka W, Zhu O Y. Simulation of water and carbon fluxes using Biome-BGC model over crops in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005,131(3):209-224.
- [19] 张越,刘康,张红娟,等.基于 BIOME-BGC 模型的秦岭北坡太白红杉林碳源/汇动态和趋势研究[J].*热带亚热带植物学报*,2019,27(3):235-249.
- [20] 韩其飞,陆研,李超凡.气候变化对中亚草地生态系统碳循环的影响研究[J].*干旱区地理*,2018,41(6):1351-1357.
- [21] Seligman N G, Cavagnaro J B, Horno M E. Simulation of defoliation effects on primary production of a warm-season, semiarid perennial-species grassland [J]. *Ecological Modelling*, 1992,60(1):45-61.
- [22] 韩其飞,罗格平,李超凡,等.放牧对新疆草地生态系统碳源/汇的影响模拟研究[J].*生态学报*,2017,37(13):4392-4399.
- [23] 周德成,罗格平,韩其飞,等.天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应[J].*生态学报*,2012,32(1):81-92.
- [24] 陈锐银,严冬春,文安邦,等.基于 GIS/CSLE 的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].*水土保持学报*,2020,34(1):17-26.
- [25] 魏梦瑶,张卓栋,刘瑛娜,等.基于 CSLE 模型的广西土壤侵蚀规律[J].*水土保持研究*,2020,27(1):15-20.

- [26] Beaumont P. Environmental management and development in drylands[M]. New York: Routledge, 1989.
- [27] 王颢霖,焦菊英,安韶山,等.新疆天山东段南北坡土壤侵蚀调查[J].水土保持通报,2019,39(4):306-313,321.
- [28] Running S W, Hunt E R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, Biome-BGC, and an application for global scale models[C]//Ehleringer J R, Field C B. Scaling Physiological Processes. San Diego:Academic Press, 1993,141-158.
- [29] 董明伟,喻梅.沿水分梯度草原群落 NPP 动态及对气候变化响应的模拟分析[J].植物生态学报,2008,32(3):531-543.
- [30] 中华人民共和国农业部.天然草地合理载畜量的计算[S].北京:中华人民共和国农业部,NY/T 635-2015, 2015.
- [31] 方精云,刘国华,徐嵩龄.中国陆地生态系统的碳库[C]//王庚辰,温璞玉.温室气体浓度和排放监测及相关过程.北京:中国环境科学出版社,1996.
- [32] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C]. Beijing: International Soil Conservation Organization Conference, 2002.
- [33] Rompaey A J J V, Govers G. Data quality and model complexity for regional scale soil erosion prediction[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 2002,16(7):663-680.
- [34] Foster G R. Revised universal soil loss equation version 2(RUSLE(2)[R]. Science Documentation, Usda-Agricultural Research Service, Washington D C, 2005.
- [35] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction[J]. Trans American Society of Agricultural Engineers, 1974,17(2):305-309.
- [36] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- [37] Liu B Y, Nearing M A, Risse M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the Asae, 1994,37(6):1835-1840.
- [38] Mccool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the Asae, 1987,30(5):1387-1396.
- [39] 蔡崇法,丁树文.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报, 2000,14(2):19-24.
- [40] Chen Y X, Lee G, Lee P, et al. Model analysis of grazing effect on above-ground biomass and above-ground net primary production of a Mongolian grassland ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2007,333(1):155-164.
- [41] 桂海月,王新军,常梦迪,等.旅游干扰下的天山北坡水蚀经济损失评估:以西白杨沟流域山地景区为例[J].农业资源与环境学报,2021,38(3):512-522.

(上接第 12 页)

- [8] 高斌,许有鹏,王强,等.太湖平原地区不同土地利用类型对水质的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(6):1186-1191.
- [9] 林明,丁晓雯,卢博鑫.降雨、地形对非点源污染产输影响机理综述[J].环境工程,2015,33(6):19-23.
- [10] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.
- [11] 黎嘉成.三峡库区石盘丘小流域氮磷非点源污染特征研究[D].重庆:西南大学,2019.
- [12] 陈磊,李占斌,李鹏,等.野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(S1):170-176.
- [13] 丛鑫,边振,薛春珂,等.不同坡度条件下的水土流失特征研究[J].中国农村水利水电,2017(5):124-128.
- [14] Li Q, Qi J, Xing Z, et al. An approach for assessing impact of land use and biophysical conditions across landscape on recharge rate and nitrogen loading of groundwater[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014,196:114-124.
- [15] 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.
- [16] 郭效丁,刘晓君,黄萍萍,等.不同土地利用方式水土及养分流失响应机制研究:以鹦鹉沟小流域为例[J].水土保持研究,2014,21(5):18-23.
- [17] 张铁钢.丹江中游小流域水—沙—养分输移过程研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [18] 徐国策,李占斌,李鹏,等.丹江鹦鹉沟小流域氮素随径流的迁移及对水质的影响[J].吉林大学学报:地球科学版,2014,44(2):645-652.
- [19] 陈仕奇,龙翼,严冬春,等.三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量[J].环境科学,2020,41(3):1276-1285.
- [20] 张耀.红枫湖水体氮、磷时空分布及影响因素分析[D].贵阳:贵州师范大学,2019.