

跨区域量化比较3种土壤类型坡面的拦蓄径流能力

闫颖如, 张文太, 胡桂清

(新疆农业大学 资源与环境学院 新疆土壤与植物生态过程自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 基于量化数值建立一个跨区域评价不同土壤类型和管理措施坡面拦蓄径流能力的指标体系, 为水土流失防治工作提供科学指导。[方法] 在新疆维吾尔自治区伊宁市北山坡的灰钙土、棕红土坡面和贵州赤水市大石河小流域的紫色土坡面各布设了4种管理措施的径流小区, 基于2019—2021年4—9月的自然降雨量和径流量观测数据, 用径流系数、径流曲线数(CN值)和降雨产流阈值数据量化比较了12个径流小区的减流能力。[结果] 不同土壤拦蓄径流能力排序为: 灰钙土<棕红土<紫色土, 其CN值分别为90.05, 89.53和77.36; 其降雨产流阈值分别为3.44, 3.50和14.96 mm。不同评价指标结果均显示, 灰钙土和棕红土管理措施坡面的拦蓄径流能力顺序为: 枯草覆盖>水平沟>增渗孔>对照; 紫色土管理措施坡面减流能力的顺序为: 园地>草地>耕地>对照。对于对照小区, 当径流系数增加1%时, 灰钙土、棕红土和紫色土的径流深分别增加了1.73, 2.61和6.79 mm; 当CN值增加1时, 3种土壤坡面的径流深则将分别减少1.00, 1.00和0.71 mm。[结论] 跨区域评价不同土壤类型坡面的减流能力时, 推荐用CN值和降雨产流阈值指标, 不宜使用径流系数。

关键词: 跨区域; 径流调控; 土壤管理措施; SCS-CN模型; 降雨产流阈值; 减流能力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0128-09

中图分类号: S157.1, P333.5

文献参数: 闫颖如, 张文太, 胡桂清. 跨区域量化比较3种土壤类型坡面的拦蓄径流能力[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 128-136. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.014; Yan Yingru, Zhang Wentai, Hu Guiqing. Quantitative comparison of runoff retention capacity for hillslopes with three soil types across regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 128-136.

Quantitative Comparison of Runoff Retention Capacity for Hillslopes with Three Soil Types Across Regions

Yan Yingru, Zhang Wentai, Hu Guiqing

(Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, College of

Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] A cross-regional index system was established based on quantitative values to evaluate the runoff retention capacity for slopes of different soil types managed under different practices in order to provide scientific guidance for the prevention and control of soil erosion. [Methods] Runoff plots with four kinds of management measures were set up on a gray calcium soil slope and a brown red soil slope of the northern slope of Yining City, Xinjiang Wei Autonomous Region, and on a purple soil slope of Dashi River basin, Chishui City, Guizhou Province. Based on observed natural rainfall and runoff data from April to September in 2019 to 2021, runoff coefficient, runoff curve number (CN value), and rainfall-runoff production threshold data were used to quantitatively compare the runoff reduction capacity of 12 runoff plots. [Results] The runoff retention capacity of different soils followed the order of gray calcium soil < brown red soil < purple soil, and the CN values were 90.05, 89.53 and 77.36, respectively. The rainfall-runoff production thresholds were 3.44, 3.50, and 14.96 mm, respectively. The results of different evaluation indexes showed that runoff retention capacity of gray calcium soil and brown red soil management

收稿日期: 2023-06-27

修回日期: 2023-10-30

资助项目: 新疆维吾尔自治区二次引进项目“基于物联网的智能节水灌溉技术应用与推广”(2022012); 新疆维吾尔自治区天山英才计划“塔额盆地旱作红花集水保墒种植增产效果研究”(2021259)

第一作者: 闫颖如(1998—), 女(汉族), 山西省原平市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持和生态修复。Email: halcyonyr@163.com.

通信作者: 张文太(1984—), 男(汉族), 山东省冠县人, 博士, 教授, 主要从事土壤水资源、雨水集蓄利用研究。Email: zwt@xjau.edu.cn.

measures followed the order of dry grass cover > horizontal ditch > seepage hole > control. Slope flow reduction ability of the purple soil management measures followed the order of garden land > grassland > cultivated land > control. When the runoff coefficient for the control plot increased by 1%, the runoff depth of gray calcium soil, brown-red soil, and purple soil increased by 1.73, 2.61, and 6.79 mm, respectively. When the CN value was increased by 1, the runoff depth of the three soil slopes decreased by 1.00, 1.00, and 0.71 mm, respectively. [Conclusion] When evaluating runoff reduction capacity of slopes of different soil types across regions, it is recommended to use CN value and rainfall-runoff production threshold, but not runoff coefficient.

Keywords: across regions; runoff regulation; soil management measures; SCS-CN model; rainfall-runoff threshold; runoff reduction capacity

2021年《中国水土保持公报》^[1]提出,全国共有水土流失面积 $2.67 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。其中,水力侵蚀面积 $1.11 \times 10^6 \text{ km}^2$,占水土流失总面积的41.35%。坡面是土壤侵蚀的基本单元^[2],次降雨的坡面产流过程受植被覆盖、地表性质、土壤性质和降雨特征等因素的影响^[3]。侵蚀性降雨及其造成的坡面产流是水土流失的原动力。通常用土壤可蚀性指标量化表征不同类型土壤抵抗降雨剥蚀的性能及其坡面产沙能力的强弱。可以参照土壤可蚀性的计算思路,找出客观量化坡面产流能力大小的评价指标。为深入理解不同气候条件下坡面产流规律及其人为调控,有必要开展跨区域的坡面拦蓄径流能力评价研究。王毅等^[4]认为径流系数是表示坡面拦蓄径流能力的关键指标。杜波等^[5]采用径流系数反映不同雨型间小流域坡面的拦蓄径流能力;向宇国等^[6]用径流系数比较了不同坡度坡耕地的产流能力。美国农业部水土保持局提出的SCS-CN经验模型是区域地表径流预测的重要工具^[7]。该模型所需参数少,资料易获取,只需一个反映降雨前流域下垫面特征和地表产流性能的综合参数—径流曲线数(CN),因此被广泛应用^[8]。张秀英等^[9]研究发现CN值与降雨量之间显著相关。符素华等^[10]和范彩霞等^[11]比较了反推CN值的5种方法,认为用算术平均法反推的CN值模型相关性较好。降雨产流阈值是指接受降雨的下垫面能够产生地表径流的最小降雨量^[2]。廖春来等^[7]认为降雨产流阈值关系到径流调控。国内外多采用直线回归法基于降雨量与径流量间的关系确定降雨产流阈值。李小雁等^[12]分析了受前期降雨和不受前期降雨影响的9个人工集水面的降雨产流阈值。黄俊等^[2]用人工模拟降雨试验建立了降雨强度、前期含水量、植被盖度与降雨产流阈值的多元回归方程。当前的研究对评价坡面减流能力使用的指标并不完全一致,有必要进一步探讨径流系数、CN值和降雨产流阈值等3个指标跨区域评价不同土壤类型坡面减流能力的适用性。为此,本研究假设:①对于不同土壤类型和

管理措施的坡面,其拦蓄径流能力并不相同;②坡面拦蓄径流能力可以借助径流系数、CN值和降雨产流阈值等的指标定量化评价。并基于新疆伊宁市北山坡和贵州省赤水市大石河流域的12个径流小区的自然降雨观测数据,验证上述两个假设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

两个研究区分别位于新疆伊宁市北山坡九城生态园(81°09'E,48°53'N)和贵州赤水市天台镇大石河小流域坡面径流场(28°31'N,105°49'E)。伊宁市属温带大陆性干旱气候,平均气温9.2℃,最低气温-36℃,多年平均降水量为206~464 mm^[13]。年内降雨分布不均,降雨主要集中在4—9月,以短历时降雨为主,地表蒸散发高,植被覆盖度低。土地利用主要以草地为主,由于草地过度开发,导致大面积草地退化,造成严重的水土流失。研究区主要土壤类型为灰钙土和红棕土,灰钙土由第四纪黄土母质发育而来,是伊犁河谷的地带性土壤,占伊犁州面积的12.0%。棕红土发育在第三纪红色砂页岩沉积的红土母质上,埋藏于灰钙土及各类疏松堆积物下,经地质作用及外力侵蚀后露出地表,再经现代成土作用而形成。两种土壤的成土母质不同造成二者性质差异明显,灰钙土坡面土壤质地为壤土,其砂粒、粉粒、黏粒含量分别为29.8%,47.9%和22.3%,具有多孔性、结持力弱的特性。红土母质存在弱成岩作用,土壤发育程度较低,常出现块状结构,质地黏重,棕红土坡面土壤质地为黏土,其砂粒、粉粒、黏粒含量分别为21.3%,33.5%和45.2%^[14]。

赤水市研究区的监测点所在流域属赤水河水系大石河支流的上游,属中亚热带湿润季风气候,四季分明,日照时数少,雨量充沛,多年平均气温18.0℃,多年平均降水量1 228.7 mm,多年平均日照时数1 145.2 h,平均无霜期354 d。紫色土是贵州省主要的土类之一,占全省面积的5.03%,在黔北的赤水河流域

集中分布。其母质为紫色砂岩风化物,紫色土坡面土壤质地为粉壤土,其砂粒、粉粒、黏粒含量分别为30.3%,50.2%和19.5%。紫色土土层浅薄,水土流失严重。

1.2 研究方法

1.2.1 径流小区布设

试验于2019—2021年4—9月

进行。如表1所示,在伊宁市九城生态园水土保持示范小区内布设8个自然降雨径流观测小区,小区面积均为20 m²;赤水市大石河小流域坡面径流场布设4个自然降雨径流观测小区,小区面积均为69 m²,试验区所有小区坡度约为13°~15°。

表 1 不同区域 12 个径流小区布设概况

Table 1 Layout of 12 runoff plots of different regions

小区编号	研究区位置	土壤类型	管理措施	措施说明
1	伊宁市	灰钙土	对照	不做任何添加和扰动,原生植物是伊犁绢蒿,覆盖度达10%~20%
2	伊宁市	灰钙土	枯草覆盖	将干枯的秸秆、稻草覆盖在小区坡面上,覆盖度为70%,覆盖量为200 g/m ²
3	伊宁市	灰钙土	水平沟	设置3条间隔均匀的横沟,沟深20 cm,沟宽15 cm,沟下沿筑10 cm高的低垄
4	伊宁市	灰钙土	增渗孔	竖直向下开凿两排间距20 cm,直径5 cm,深15 cm的孔,与水平沟位置对齐
5	伊宁市	棕红土	对照	不做任何添加和扰动,原生植物是猪毛菜,覆盖度达到10%~20%
6	伊宁市	棕红土	枯草覆盖	将干枯的秸秆、稻草覆盖在小区坡面上,覆盖度为70%,覆盖量为200 g/m ²
7	伊宁市	棕红土	水平沟	设置3条间隔均匀的横沟,沟深20 cm,沟宽15 cm,沟下沿筑10 cm高的低垄
8	伊宁市	棕红土	增渗孔	竖直向下开凿两排间距20 cm,直径5 cm,深15 cm的孔,与水平沟位置对齐
9	赤水市	紫色土	对照	不做任何添加和扰动
10	赤水市	紫色土	草地	人工种植的黑麦草
11	赤水市	紫色土	耕地	分两季换种,夏季种红薯、秋季种马铃薯,和水平沟一样是横坡设垄
12	赤水市	紫色土	园地	经果林栽种黄金梨

1.2.2 测定指标 试验区设定小型气象站,监测试验期间降雨气象数据。试验中每个小区都在周围设置了围埂,底部均设置集流槽,集流槽下与大型集流桶相连接,以便收集径流。

1.2.3 数据处理与计算

(1) 径流系数。径流系数 α 表示降水量转化为径流量的比例。

$$\alpha = \frac{R}{P} \quad (1)$$

式中: α 为径流系数; R 为径流量(mm); R 数据均为总径流量除以面积所得; P 为降水量(mm)。

(2) 径流曲线数(CN)。为简化SCS-CN模型参数,假设降雨的初损值(I_a)是潜在最大损失量的2/10,即 $I_a=0.2S$,带入模型公式,反推得到^[15]:

$$S = 5(P + 2R - \sqrt{4R^2 + 5PR}) \quad (2)$$

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (3)$$

式中: S 为潜在最大损失量(mm); CN 为径流曲线数。对实际次降雨径流数据求 S 值,对每个 S 求对应的 CN 值,最后取 CN 的平均值。理论上, CN 值的范围是0~100,但实际在30~100之间。

(3) 降雨产流阈值。通过回归分析建立降雨量和径流量的直线回归方程,得出降雨产流阈值^[16]:

$$R = B_1(P - B_2) + \epsilon$$

式中: B_1 为次径流系数(%); B_2 为降雨产流阈值

(mm); ϵ 为误差项。令 $R=0$,计算此时的降雨量,即得到12个小区的降雨产流阈值。

(4) 指标比值。

$$\text{径流系数比值} = \frac{\text{管理措施径流系数}}{\text{对照径流系数}} \quad (4)$$

式中:管理措施径流系数是指同种土壤类型下各管理措施的径流系数(%);同理 CN 值比值和降雨产流阈值比值也用类似方法求得。

用Excel 2023整理和分析数据,SPSS 27.0软件进行数据处理,用Origin 2022进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 产流降雨量

自然降雨具有随机性和突发性,降雨量年际间变化大。由于伊宁市降雨主要集中在春夏季节(4—9月),6—8月的降雨最多。为了更好地进行跨区域比较,两个地区的降雨数据均选在了4—9月。根据新疆降雨量等级标准^[17]将观测期日降雨划分为:小雨(0.1~6.0 mm)、中雨(6.1~12.0 mm)、大雨(12.1~24.0 mm)和暴雨(≥ 24.1 mm)。2019—2021年4—9月伊宁市平均年降雨量为91.6 mm,低于同时期常年值151 mm^[18],表明2019—2021年为枯水年。次降雨量最小仅为0.1 mm,最大为21.4 mm。如图1所示,伊宁各等级降雨量差别明显,降雨主要为小雨,占降雨总场次的85%,发生暴雨的概率低。

根据国家降雨等级标准^[19]将贵州日降雨划分为:小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)、暴雨(50.0~99.9 mm)和大暴雨(100.0~249.9 mm)。1951—2021 年贵州多年平均降雨量约为 1 210 mm,整体呈下降趋势,平均下降速率为 23.46 mm/10 a^[20]。年降雨量呈现“峰—谷—峰”的较大波动趋势。贵州赤水市 2019—2021 年平均年降雨量为 1 363.1 mm,与多年平均降雨量相比雨量偏多,表明观测期为丰水年。在降雨量较多的丰水

年更能体现不同处理之间的产流产沙差异。赤水市降雨量中小雨和中雨占比最多,但小雨事件无地表径流产生。2020 年大雨和暴雨较多,只有 2021 年发生了大暴雨,高达 273.2 mm,约为伊宁市北山坡 3 a 降雨量之和。如图 1 所示,研究期间伊宁市共有 17 场降雨产流,主要为中雨。赤水市有 39 场降雨产流,主要为大雨和暴雨。径流深随着每年降雨量的不同而变化。同样的降雨条件下,不同管理措施均为对照产生的径流最多。

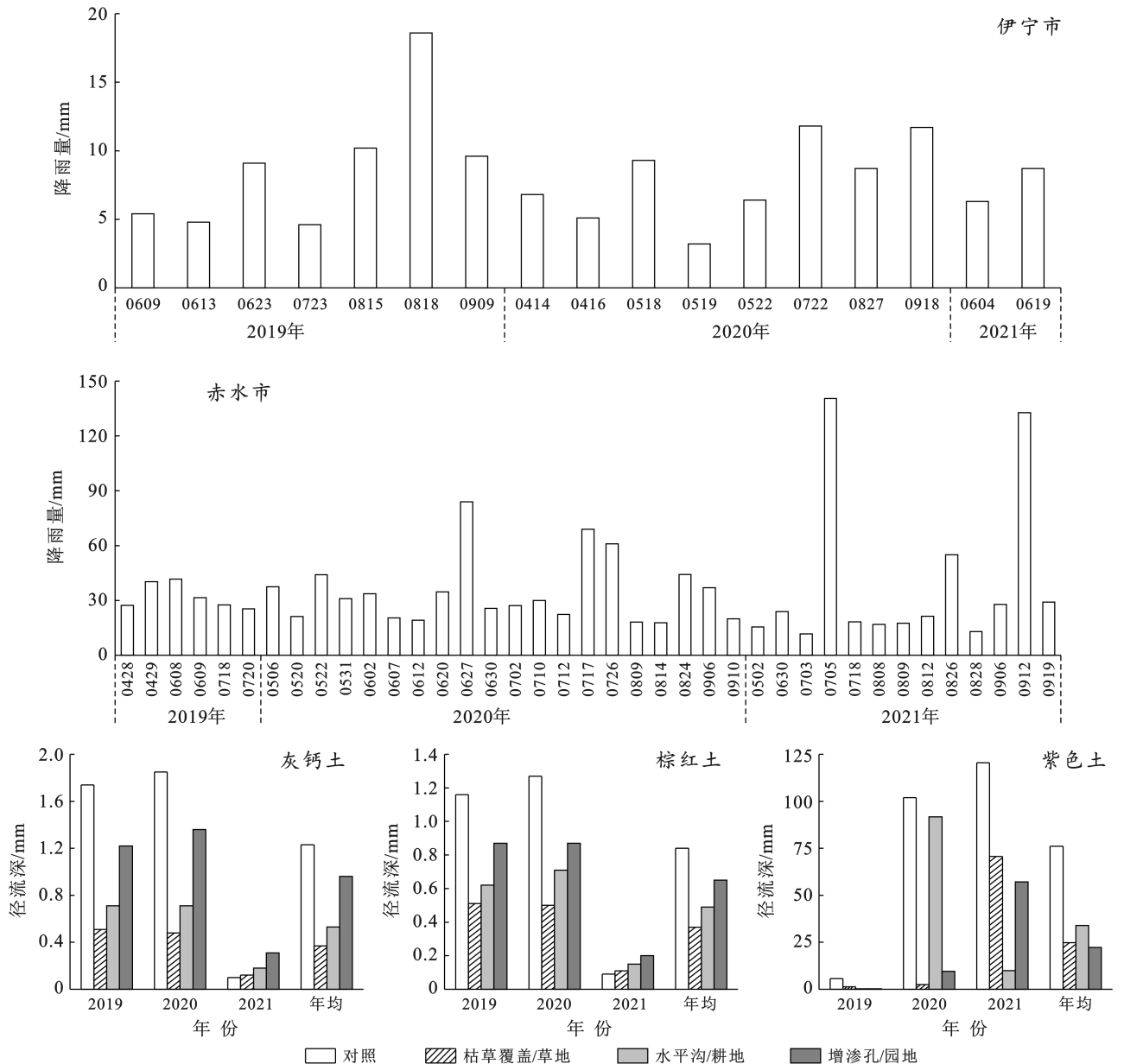


图 1 不同区域产流降雨量及 3 种土壤类型坡面小区的径流深

Fig.1 Runoff rainfall and runoff depths of three types of soil in slope runoff plots

2.2 不同管理措施下径流系数的年变化

由图 2 可以看出,灰钙土和棕红土在研究期间径流系数的年际变化整体趋势相同,均先增后减;紫色

土不同管理措施坡面径流系数的年际变化差异明显,受研究区年降雨量、产流情况影响较大。灰钙土和棕红土不同管理措施下,皆为对照的年径流系数最高,

枯草覆盖最低,是因为枯草自身可作为吸水材料,拦截部分径流。整体来看,灰钙土的径流系数高于棕红土,表明同样的降雨条件下,棕红土的减流能力高于灰钙土。紫色土各措施地形条件的不同影响了坡面产流,造成措施间年径流系数的变化较大,其中耕地年径流系数的变化尤为明显,2020年高达5.97%。这可能是由于2020年大雨和暴雨频次多,横坡耕作小区水流易于汇集造成的。灰钙土对照小区的年平均径流系数为1.31%,是枯草覆盖小区0.37%的3.50倍,棕红土对照小区的年平均径流系数为0.88%,是枯草覆盖小区0.37%的2.40倍,说明枯草覆盖在降低地

表径流方面效果更好。两种土壤不同管理措施对径流系数的影响顺序均为:枯草覆盖<水平沟<增渗孔<对照。紫色土对照小区年平均径流系数为5.44%,是园地1.67%的3.26倍,是草地1.89%的2.88倍。紫色土不同措施对径流系数的影响顺序为:园地<草地<耕地<对照。如图2所示,分析3种土壤类型对照小区径流系数对径流深(R)的影响,可以得出径流系数和 R 均存在显著正相关,径流系数每增加1%,灰钙土 R 增加1.73 mm,棕红土 R 增加2.61 mm;紫色土 R 变化幅度最大,为6.79 mm。紫色土小区的径流系数通常高于灰钙土和棕红土小区。

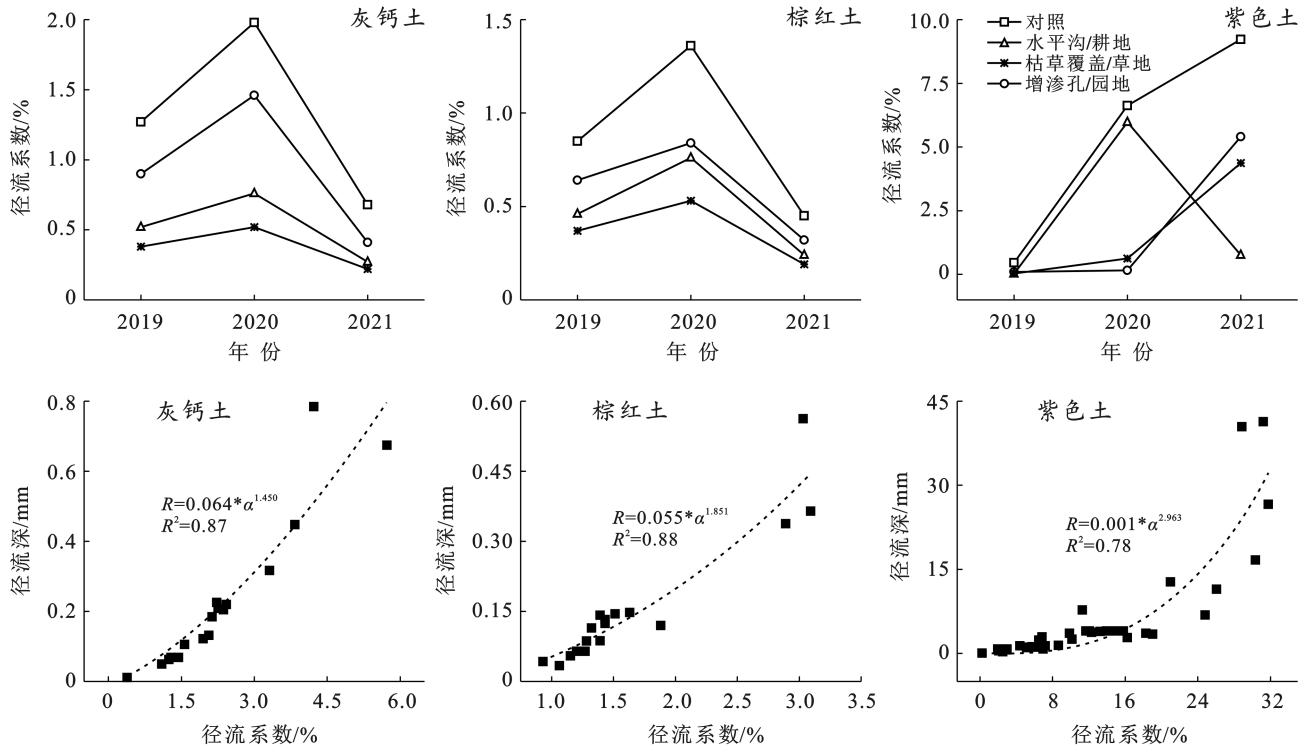


图2 各管理措施径流系数的年变化及各对照小区径流系数对径流深的影响

Fig.2 Annual variation of runoff coefficient of each management measure and influence of runoff coefficient of each control plot on runoff depth

2.3 不同管理措施对CN值的影响

由图3可知,灰钙土小区中CN值最高的是对照小区,为90.05;最低的是枯草覆盖小区,为88.54;仅相差1.51。棕红土小区中CN值最高的是对照小区,为89.53;最低的是枯草覆盖小区,为88.42;相差1.11。表明灰钙土和棕红土坡面下各管理措施对CN值的影响较小,灰钙土4种管理措施的CN平均值略高于棕红土。两种土壤类型坡面各措施的减流能力顺序一致,均表现为:枯草覆盖>水平沟>增渗孔>对照。紫色土坡面CN值低于灰钙土和棕红土,其对照小区CN值为77.36,园地CN值最低,为64.87,说明紫色土的管理措施对CN值和小区径流调控的作

用更大。紫色土坡面减流能力顺序为:园地>草地>耕地>对照。用CN值作为量化指标,具体表现在管理措施引起的径流深变化。CN值越低,表示该径流小区的减流能力越好。如图3所示,灰钙土中枯草覆盖的CN值最低,与对照相差1.51,引起径流深变化2.79 mm。同理,棕红土中枯草覆盖的CN值最低,与对照相差1.12,径流深变化1.54 mm;紫色土中园地的CN值最低,与对照相差12.49,径流深变化161.26 mm。紫色土CN值低主要是因为其潜在最大蓄水量 S 值高,紫色土园地小区 S 值为145,而灰钙土枯草覆盖小区 S 值仅为34。分析3种土壤类型对照小区CN值对径流深的影响,可以得出CN值与径

流深存在负相关关系(图 4),当 CN 值每增加 1 时,灰钙土径流深减少约 1.00 mm;棕红土径流深减少约

1.00 mm;而紫色土径流深减少 0.71 mm。CN 值结果显示紫色土的减流能力高于棕红土和灰钙土。

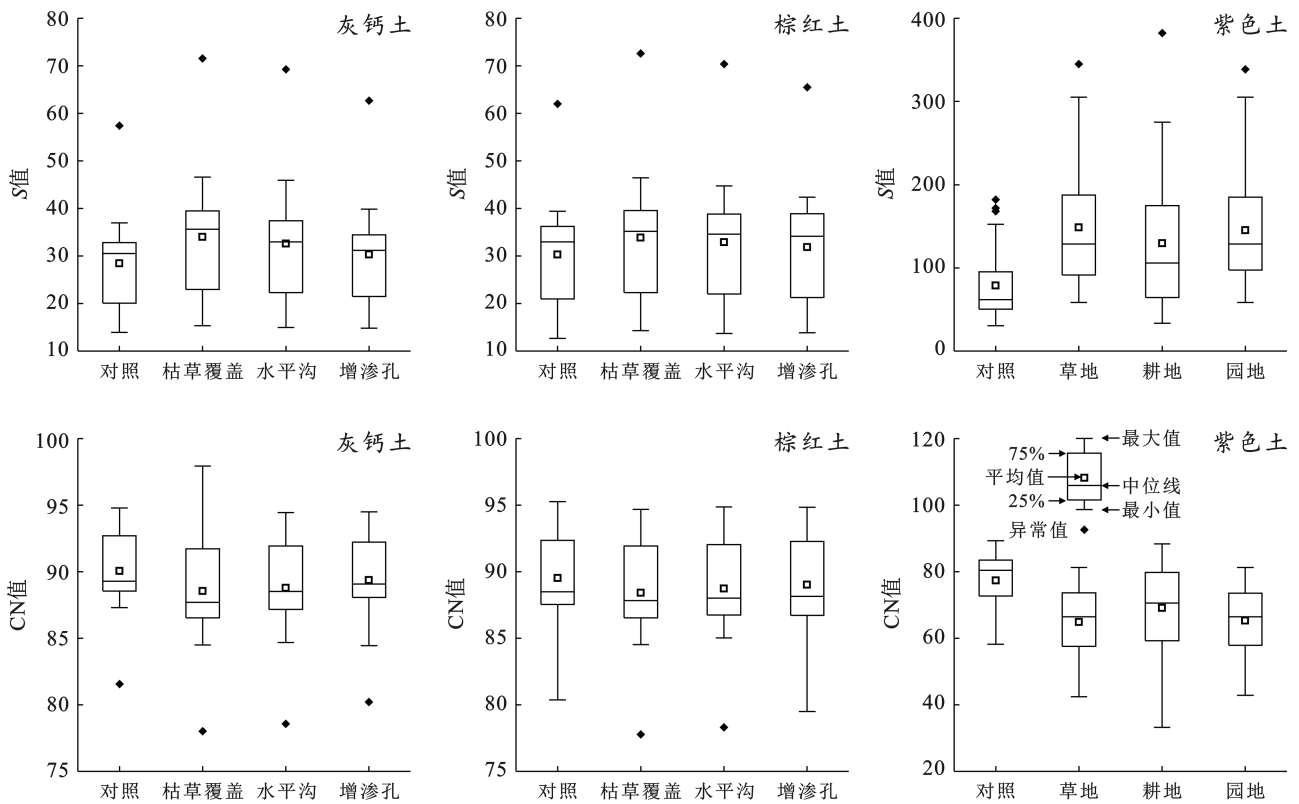


图 3 不同土壤管理措施的 S 值和 CN 值

Fig.3 S value and CN value of different soil management measures

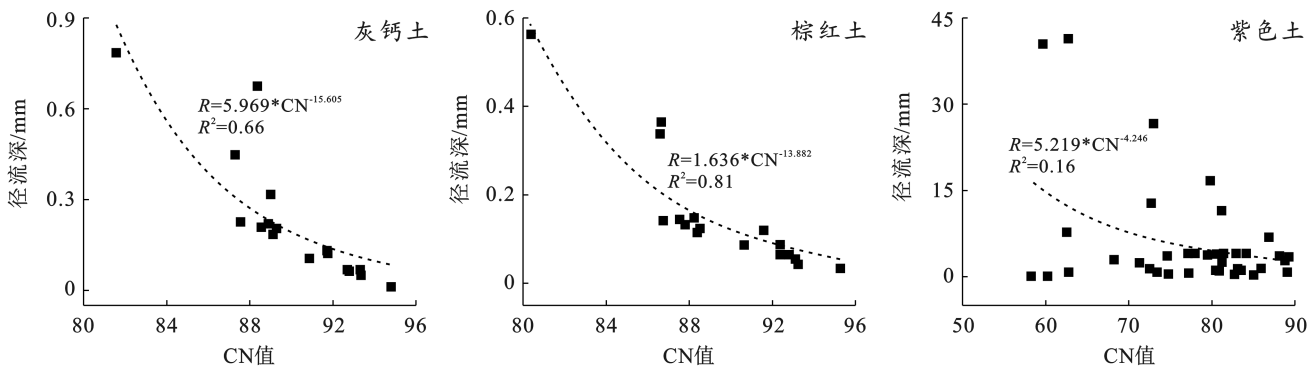


图 4 各对照小区的 CN 值对径流深的影响

Fig.4 Effect of CN value on runoff depth in control plots

2.4 降雨产流阈值

同一土壤类型各管理措施间降雨产流阈值差别不大(表 2)。对于伊宁市研究区,对照小区产流时所需的降雨量最小,枯草覆盖的降雨产流阈值最大;水平沟和增渗孔的差距在 0.1 mm 以下。棕红土和灰钙土坡面降雨产流阈值顺序均为:枯草覆盖>水平沟>增渗孔>对照,但灰钙土降雨产流阈值整体高于棕红土。紫色土园地小区产流时所需的降雨量最大,达

到 27.92 mm,约为对照小区的两倍。紫色土坡面降雨产流阈值顺序为:园地>草地>耕地>对照。用降雨产流阈值作为量化指标,具体表现在管理措施引起的降雨量变化。阈值的增加相当于增加雨水入渗抵消掉的雨量。降雨产流阈值越高,下垫面能够产生地表径流的最小降雨量越高。如表 2 所示,与对照相比,管理措施的阈值均有增加。灰钙土中枯草覆盖的阈值最高,与对照相比提高了 0.44 mm。棕红土中枯

草覆盖的效果最好,比对照提高了 0.61 mm;紫色土中园地的效果最好,比对照提高了 12.96 mm。3 种土壤的对照小区没有任何措施,且植被覆盖度很低,蒸散发量高;其降雨产流阈值反映了降雨在坡面上的人渗、表面填洼和降雨过程中的蒸发。棕红土枯草覆盖小区降雨产流阈值比对照高 0.61 mm,表明产流的次降雨中至少有 0.61 mm 被枯草植被截留。不同管理措施的降雨产流阈值都高于对照,表明土壤管理措施提高了坡面的减流能力。

表 2 不同管理措施坡面小区降雨产流阈值的比较

Table 2 Comparison of rainfall-runoff thresholds for hillslope plots under different management measures

土壤	措施	样本数	拟合方程	R^2	降雨产流阈值/mm
灰钙土	对照	17	$R = -0.062 + 0.018 \times P$	0.83	3.44
	枯草覆盖	17	$R = -0.137 + 0.035 \times P$	0.87	3.91
	水平沟	17	$R = -0.097 + 0.025 \times P$	0.83	3.88
	增渗孔	17	$R = -0.052 + 0.014 \times P$	0.92	3.71
棕红土	对照	17	$R = -0.070 + 0.020 \times P$	0.86	3.50
	枯草覆盖	17	$R = -0.226 + 0.055 \times P$	0.93	4.11
	水平沟	17	$R = -0.158 + 0.039 \times P$	0.83	4.06
	增渗孔	17	$R = -0.061 + 0.015 \times P$	0.95	4.05
紫色土	对照	39	$R = -5.895 + 0.396 \times P$	0.89	14.96
	草地	39	$R = -5.054 + 0.187 \times P$	0.57	27.03
	耕地	39	$R = -5.965 + 0.254 \times P$	0.43	23.48
	园地	39	$R = -6.338 + 0.227 \times P$	0.67	27.92

注:R 表示径流深;P 表示降雨量。

2.5 坡面拦蓄径流能力指标的相关性

为探索构建评价跨区域坡面减流能力的指标体系,有必要进一步分析 12 个径流小区径流系数、CN 值和降雨产流阈值之间的相关性(表 3)。Pearson 相关分析结果表明,CN 值与降雨产流阈值存在极显著

水平的负相关关系,径流小区的降雨产流阈值越大,越不易产生径流,其减流能力就越好;CN 越大,则表明减流能力越差。但是,径流系数与 CN 值和降雨产流阈值之间的相关关系均不显著。

表 3 减流能力指标的相关分析

Table 3 Correlation analysis of runoff reduction capability index

项目	径流系数	CN 值	降雨产流阈值
径流系数	1		
CN 值	-0.510(0.090)	1	
降雨产流阈值	0.510(0.090)	-0.998(0.000**)	1

注:**,* 分别代表 1%,5% 的显著性水平。

2.6 土壤管理措施对评价指标的影响

同一土壤类型下,各指标对不同管理措施坡面的减流能力排序结果一致。与各自的对照小区相比较,能更加直观显示土壤管理措施对坡面减流能力的影响。如图 5 所示,径流系数比值中,灰钙土枯草覆盖、水平沟和增渗孔坡面的减流能力分别增加了 71.76%,60.31%和 29.77%;棕红土 3 种措施减流能力分别增加了 57.95%,44.32%和 31.82%;紫色土草地、耕地和园地措施减流能力则分别增加 65.26%,58.64%和 69.30%。灰钙土和棕红土坡面枯草覆盖的减流效果最好,紫色土坡面园地的减流效果最好。就 CN 值比值而言,伊宁市研究区不同管理措施对 CN 值的影响很小;但仍为枯草覆盖的减流效果最佳,灰钙土和棕红土分别提高了 1.68%和 1.24%。紫色土坡面仍为园地的减流效果最好,提高了 15.58%。降雨产流阈值比值中也是枯草覆盖(12.02%,14.84%)和园地(46.42%)的减流效果最佳。人为管理措施能够影响径流小区的减流能力,在实际生产中可以增加有效地表覆盖,以减少水土流失。

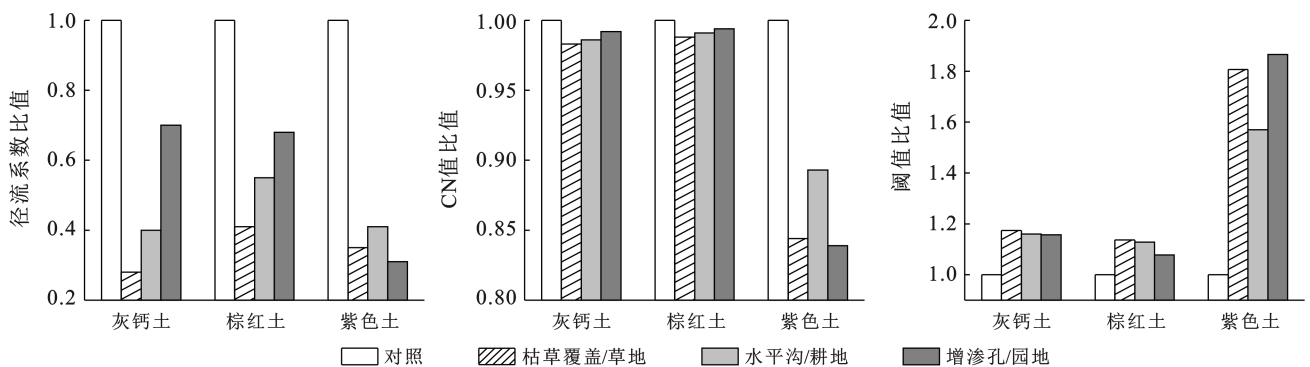


图 5 各管理措施评价指标与对照的比值

Fig.5 Ratio of each management measure evaluation by control index

3 讨论

3.1 径流小区减流能力对土壤类型的响应

土壤黏粒含量越少,降雨时更易形成结皮,增加坡面的产流量^[14]。土壤孔隙度影响雨水下渗及其在土体中的迁移。本研究中,同一研究区棕红土的总孔隙度和非毛管孔隙度均高于灰钙土^[18],因此,灰钙土对照小区产流更多,而棕红土小区的减流能力更强。由于紫色土和棕红土所在的两个研究区自然降雨条件不一致,不能直接用径流数据比较其减流能力的强弱。用 CN 值和降雨产流阈值指标比较两种土壤类型的减流能力时,皆为紫色土更好。事实上,基于全国 55 个研究区的统计数据表明,CN 值随着降雨量的增加呈幂指数降低趋势^[15]。后续还需要根据实测的土壤饱和导水率等指标,进一步比较紫色土和棕红土的拦蓄径流能力。分析对照小区的径流系数及两个区域相同降雨等级下的 3 场次降雨的平均径流系数时,均为紫色土最高。径流系数受降雨量和径流量的影响,赤水市降雨多且频次高,使土壤前期含水量高,导致产流比例高。而伊宁市温度高,蒸散发强烈,降雨少且频次低,水分入渗多,导致产流比例低。因此,受降雨、蒸散发等气候因素影响较大的径流系数不能跨区域客观评价土壤自身减流能力的强弱。评价跨区域土壤类型的减流能力时,用 CN 值和降雨产流阈值更好。2023 年印发的《关于加强新时代水土保持工作的意见》要求强化水土保持监测等信息共享和部门间互联互通,跨区域比较分析径流小区坡面的 CN 值、降雨产流阈值等基础数据,有利于更深入地开展水土流失规律与机理研究。

3.2 降雨产流阈值的影响因素

降雨产流阈值是坡面产流规律研究的重要参数^[20]。在不考虑管理措施的情况下,本文计算的灰钙土和棕红土的降雨产流阈值分别为 3.74 和 3.93 mm,这与基于该研究区次降雨资料和错过度、剔除率等指标计算的侵蚀性降雨标准 4.0 mm 相接近^[21]。自然降雨条件下,产流过程十分复杂,会受到土壤前期含水量和降雨量等因素的影响。无降雨时期,灰钙土土壤含水量一般为 3.1%~5.6%,棕红土土壤含水量一般为 4.0%~6.6%。以对照为例,2020 年 5 月 18 日降雨为 9.3 mm,灰钙土和棕红土土壤含水量皆为 8.9%;紧接着 5 月 19 日降雨 3.2 mm,土壤含水量分别为 10.6%和 28.8%。降雨仅 3.2 mm 就产生径流是受到了前期降雨的影响,但土壤前期含水量与径流量二者相关关系不显著。李小雁等^[12]在甘肃皋兰试验站的研究表明,降雨间隔 3 d 以下的降雨

事件其产流受前期降雨的影响。水平沟在降雨后能拦截大量雨水,使表层土壤含水量增加,但随着日照时间长,温度升高,蒸发量增加,土壤含水量又快速下降^[13]。周国逸等^[22]将研究期所有降雨按时间次序排列,把发生产流和未发生产流的降雨都考虑在内,求得降雨产流阈值随时间尺度的变化。实际情况下,降雨量大未必产流,降雨量小未必不产流,本文计算降雨产流阈值仅考虑了产流时的降雨量。后续研究需要将观测期所有降雨都纳入考虑,求出降雨产流阈值范围,以更全面地反映某一地区不同坡面的减流能力。

4 结论

(1) 本文使用径流系数、CN 值和降雨产流阈值量化评价了 12 个径流小区坡面的拦蓄径流能力。3 个指标对同一区域不同管理措施的排序结果一致。灰钙土和棕红土坡面的拦蓄径流能力顺序为:枯草覆盖>水平沟>增渗孔>对照;紫色土坡面的减流能力顺序为:园地>草地>耕地>对照。

(2) 对于对照小区,当径流系数增加 1%时,灰钙土、棕红土和紫色土坡面的径流深将分别增加 1.73、2.61 和 6.79 mm。当 CN 值增加 1 时,3 种土壤坡面的径流深则将分别减少了 1.00、1.00 和 0.71 mm。3 种土壤拦截径流能力的顺序为:紫色土>棕红土>灰钙土,其 CN 值分别为 77.36、89.53、90.05;其降雨产流阈值分别为 14.96、3.50 和 3.44 mm。

(3) 跨区域量化评价不同土壤类型坡面的拦截径流能力时,推荐使用 CN 值和降雨产流阈值,不宜使用径流系数。

参考文献 (References)

- [1] 陆桂华,仲志余,蒲朝勇,等.中国水土保持公报(2021年)[M].北京:中华人民共和国水利部,2022.
Lu Guihua, Zhong Zhiping, Pu Zhaoyong, et al. China Soil and Water Conservation Bulletin (2021) [M]. Beijing: Ministry of Water Resources, People's Republic of China, 2022.
- [2] 黄俊,吴普特,赵西宁.多参数非线性降雨产流阈值模型试验研究[J].北京林业大学学报,2011,33(1):84-89.
Huang Jun, Wu Pute, Zhao Xining. Experimental study on the nonlinear multi-parameter rainfall-runoff threshold model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011,33(1):84-89.
- [3] 方海燕,蔡强国,李秋艳.黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究[J].地理研究,2009,28(3):583-591.
Fang Haiyan, Cai Qiangguo, Li Qiuyan. Study on the runoff generation capacity of slope surface and its influ-

- encing factors in a hilly loess region on the Loess Plateau [J]. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 583-591.
- [4] 王毅, 李永坤, 霍风霖, 等. 白河流域产流能力与驱动力诊断分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(3): 41-45.
Wang Yi, Li Yongkun, Huo Fenglin, et al. Analysis of storm runoff and driving forces in Baihe River basin [J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(3): 41-45.
- [5] 杜波, 唐丽霞, 潘佑静, 等. 贵州喀斯特地区侵蚀性次降雨产流产沙特征研究[J]. *西南林业大学学报*, 2016, 36(5): 111-117.
Du Bo, Tang Lixia, Pan Youjing, et al. Study on the characteristics of single erosive rainfall and runoff and sediment yield in karst area of Guizhou [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2016, 36(5): 111-117.
- [6] 向宇国, 张丹, 陈凡, 等. 降雨和坡度对植烟坡耕地产流产沙的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(5): 1121-1127.
Xiang Yuguo, Zhang Dan, Chen Fan, et al. Effect of rainfall and slope on runoff and sediment production of tobacco slope farmland [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(5): 1121-1127.
- [7] 廖春来, 罗明明, 周宏. 鄂西岩溶槽谷区洼地的水位响应特征及产流阈值估算[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(6): 802-809.
Liao Chunlai, Luo Mingming, Zhou Hong. Water level response characteristics and runoff threshold estimation of karst depressions in a valley region, Western Hubei Province [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 802-809.
- [8] Verma S, Verma R K, Mishra S, et al. A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, 62(9/12): 1891-1930.
- [9] 张秀英, 孟飞, 丁宁. SCS 模型在干旱半干旱区小流域径流估算中的应用[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4): 172-174.
Zhang Xiuying, Meng Fei, Ding Ning. Application of SCS model to estimating the quantity of runoff of small watershed in semi-arid or arid region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4): 172-174.
- [10] 符素华, 王向亮, 王红叶, 等. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 415-421.
Fu Suhua, Wang Xiangliang, Wang Hongye, et al. Method of determining CN value in the SCS-CN method [J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(3): 415-421.
- [11] 范彩霞, 王少丽, 路明, 等. SCS 模型在大红门流域径流量计算中的应用[J]. *人民珠江*, 2019, 40(11): 16-20.
Fan Caixia, Wang Shaoli, Lu Ming, et al. Application of SCS model for calculation of the rainfall runoff in da-
- hongmen river basin [J]. *Pearl River*, 2019, 40(11): 16-20.
- [12] 李小雁, 龚家栋, 高前兆. 人工集水面临界产流降雨量确定试验研究[J]. *水科学进展*, 2001, 12(4): 516-522.
Li Xiaoyan, Gong Jiadong, Gao Qianzhao. Experimental study on threshold rainfall determination for artificial rainwater-harvesting catchments [J]. *Advances In Water Science*, 2001, 12(4): 516-522.
- [13] 普颖颖, 张文太, 李政, 等. 自然及管理因素对伊犁河谷草地土壤水分动态的影响[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1): 58-64.
Pu Yingying, Zhang Wentai, Li Zheng, et al. Effects of natural and management factors on soil moisture dynamics of grassland in Ili River valley [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(1): 58-64.
- [14] 李政, 胡桂清, 瞿涛, 等. 伊犁河谷不同管理草地产流产沙对降雨与土壤类型的响应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 62-69.
Li Zheng, Hu Guiqing, Qu Tao, et al. Responses of runoff and sediment yield to rainfall, soil types under different managed grasslands in Yili valley [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 62-69.
- [15] Lian Huishu, Yen Haw, Huang Jrchuan, et al. CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China [J]. *Water Research*, 2020, 177: 115767.
- [16] Fink D H, Frasier G W. Evaluating weathering characteristics of water-harvesting catchments from rainfall-runoff analyses [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(3): 618-622.
- [17] 刘波, 肖子牛. 1961—2005 年新疆区域分级雨日(量)的气候特征[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(3): 419-428.
Liu Bo, Xiao Ziniu. Climatic features of graded rain in Xinjiang from 1961 to 2005 [J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(3): 419-428.
- [18] 李政. 伊犁河谷沟壑区草地集雨模式及其生态效应[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆农业大学博士学位论文, 2022.
Li Zheng. Rainfall collection model and ecological effect of grassland in gully region of Yili Valley [D]. Urumqi, Xinjiang: Doctoral Dissertation of Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [19] 乔林, 李延香, 符娇兰, 等. 降水量等级: GB/T28592—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Qiao Lin, Li Yanxiang, Fu Jiaolan, et al. Precipitation Grade: GB/T28592-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

- assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 446-459.
- [32] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1214-1232.
Wang Tianfu, Gong Zhiwen, Deng Yuanjie. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi Province based on land use change [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1214-1232.
- [33] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 91-97, 294.
Xu Hanqiu. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(7): 91-97.
- [34] 岳奕帆, 陈国鹏, 王立, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的甘肃舟曲县生态环境质量动态监测与评价[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1608-1614.
Yue Yifan, Chen Guopeng, Wang Li, et al. Dynamic monitoring and evaluation of ecological environment quality in Zhouqu County, Gansu, China based on Google Earth Engine cloud platform [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1608-1614.
- [35] 吴树荣, 潘换换, 姬倩倩, 等. 基于生态系统服务的山西黄河流域保护优先区识别[J]. *生态学报*, 2022, 42(20): 8126-8137.
Wu Shurong, Pan Huanhuan, Ji Qianqian, et al. Identification of priority conservation areas in the Yellow River Basin of Shanxi Province based on ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(20): 8126-8137.
- [36] 农兰萍, 王金亮, 玉院和. 基于改进型遥感生态指数 (MRSEI) 模型的滇中地区生态环境质量研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(8): 972-982.
Nong Lanping, Wang Jinliang, Yu Yuanhe. Research on ecological environment quality in central Yunnan based on MRSEI model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(8): 972-982.
- [37] 施馨雨, 赵筱青, 普军伟, 等. 基于斑块尺度的云南省景观生态安全时空演变及归因[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8087-8098.
Shi Xinyu, Zhao Xiaqing, Pu Junwei, et al. Spatio-temporal evolution and attribution of Landscape Ecological Security at patch scale in Yunnan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8087-8098.
- [38] 覃彬桂, 林伊琳, 赵俊三, 等. 基于 InVEST 模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(2): 809-820.
Qin Bingui, Lin Yilin, Zhao Junsan, et al. Identification of key areas for the ecological restoration of territorial space in Kunming based on the InVEST model and circuit theory [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(2): 809-820.
- [39] 陈相标, 丁文荣. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别: 以滇中五大高原湖泊流域为例[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6): 2248-2260.
Chen Xiangbiao, Ding Wenrong. Identification of key areas for ecological restoration of territorial space based on ecological security pattern: A case of five plateau lake basins in central Yunnan [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(6): 2248-2260.
- Huang Guoping, Zhang Wentai, Chen Jingmei, et al. Influence of rainfall characteristics on runoff and sediment yield in Ili valley [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2021, 56(3): 109-116.
- [22] 周国逸, 闫俊华, 申卫军, 等. 马占相思人工林和果园地表径流规律的对比研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 451-458.
Zhou Guoyi, Yan Junhua, Shen Weijun, et al. Surface flow in an *Acacia mangium* plantation and an orchard in Heshan, Guangdong Province, China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(4): 451-458.

(上接第 136 页)

- [20] 熊美, 周秋文, 孙荣国. 1951—2021 年贵州气温和降雨变化特征[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2023, 62(6): 22-30.
Xiong Mei, Zhou Qiuwen, Sun Rongguo. Characteristics of the temperature and rainfall variations in Guizhou during 1951—2021 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2023, 62(6): 22-30.
- [21] 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.