

京郊强降雨条件下不同水土保持治理措施配置模式效益评价

杨润泽¹, 冯天骄¹, 肖辉杰¹, 王奋忠², 赵泽坤¹, 王世雷², 朱俊英¹

(1.北京林业大学水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083;
2.北京市密云区水土保持工作站,北京 101500)

摘要:以石匣小流域水土保持科技示范园 10 个不同水土保持措施配置模式的径流小区为研究对象,分析当地2004—2019 年降雨格局变化,并以发生在 2010—2018 年的 19 次代表性强降雨作为样本降雨事件,探究不同配置模式对土壤侵蚀与面源污染特征的影响。结果表明:(1)2004—2019 年降雨量变化范围在 331.4~598.9 mm,平均年降雨量 484 mm,小雨、中雨的发生频率降低,大雨的发生频率增加。(2)水土保持措施在减流减沙、减少养分流失方面效果明显。在减轻地表径流方面,表现最好的配置模式为鱼鳞坑苜蓿地与玉米梯田,其减流率分别为 88.59%,88.40%;在减少泥沙方面,最好的配置模式为玉米梯田,减沙率高达 97.82%;在降低面源污染方面,表现最好的配置模式为玉米梯田,其对 TN、TP、COD 的减少率分别为 79.57%,75.90%,91.31%。(3)在强降雨条件下,降雨量与产流产沙量、TN、TP、COD 均呈正相关关系,且降雨量与径流量、径流系数相关性较强,相关系数分别为 0.608,0.553。 I_{30} 、 I_{60} 与产流产沙量、COD 的相关性较强。另外,降雨历时、 I_{60} 与 TN、TP、COD 相关性也较强。研究成果为揭示京郊地区强降雨条件下坡面土壤侵蚀机理提供了参考依据,同时为当地开展强降雨下的水土保持工作提供科学依据。

关键词: 土壤侵蚀; 面源污染; 强降雨; 配置模式

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0008-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.002

Evaluating the Benefits of Different Soil and Water Conservation Measures Under Heavy Rainfall Conditions in the Suburban Areas of Beijing

YANG Runze¹, FENG Tianjiao¹, XIAO Huijie¹, WANG Fenzhong²,
ZHAO Zekun¹, WANG Shilei², ZHU Junying¹

(1.*Institute of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Ministry of Education, Beijing 100083; 2.Water and Soil Conservation Station, Miyun District, Beijing 101500*)

Abstract: Ten runoff plots with different configuration patterns of soil and water conservation measures in Shixia watershed Soil and Water Conservation Technology Demonstration Park were used as the study objects, and the changes in local rainfall patterns from 2004—2019 were firstly analyzed. In addition, 19 representative heavy rainfall events occurring in 2010—2018 were used as sample rainfall events to explore the effects of different configuration patterns on soil erosion and non-point source pollution characteristics. The results showed that: (1) Rainfall variation from 2004—2019 ranged 331.4~598.9 mm, with an average annual rainfall of 484 mm, a decrease in the frequency of light and moderate rainfall, and an increase in the frequency of heavy rainfall. (2) Soil and water conservation measures were effective in reducing flow and sediment and nutrient loss. In terms of reducing surface runoff, the best configuration models were fish scale pit clover fields and maize terraces, with flow reduction rates of 88.59% and 88.40% respectively; in terms of reducing sediment, the best configuration model was maize terraces, with a sediment reduction rate of 97.82%; in terms of reducing non-point source pollution, the best-performing configuration model was maize terraces, whose reduction rates for TN, TP and COD were 79.57%, 75.90% and 91.31% respectively. (3) Under

收稿日期:2021-07-11
资助项目:国家林业局林业软科学研究项目(2020131016)
第一作者:杨润泽(1996—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:yangrunze0606@163.com
通信作者:冯天骄(1991—),男,博士,讲师,主要从事生态水文研究。E-mail:fengtianjiaobest@sina.cn

heavy rainfall conditions, rainfall was positively correlated with flow production and sediment production, TN, TP and COD, and the correlation between rainfall and runoff volume and runoff coefficient were higher, with correlation coefficients of 0.608 and 0.553 respectively. I_{30} and I_{60} were more highly correlated with flow production and sediment production and COD. In addition, the correlations of rainfall ephemeris and I_{60} with TN, TP and COD were also high. The results of the study provide a reference basis for revealing the soil erosion mechanism of slopes under heavy rainfall conditions in suburban areas of Beijing, and at the same time provide a scientific basis for local work on soil and water conservation under heavy rainfall.

Keywords: soil erosion; non-point source pollution; heavy rainfall; configuration model

土壤侵蚀是目前全世界最严重的生态环境问题之一,受到全世界的广泛关注。全世界有大量的土地因土壤侵蚀而遭到破坏,除了造成农耕地生产力下降、水质污染等环境问题外,还易诱发山洪、泥石流等威胁人民生命与财产安全的灾难事件^[1]。中国是世界上水土流失问题最严重的国家之一,严重的土壤侵蚀主要发生在生态脆弱的北方土石山区,比如,位于北京郊区的密云水库上游流域^[2]。

北京市作为我国首都,在生态建设方面做了大量工作,同时也取得了一定效果。北京郊区环绕首都周围,具有人口较为集中、交通便利的特点,近年来随着城市化进程的加快,生产建设项目越来越多地集中于该地区。由于城郊地区地理位置的特殊性,导致该地区人为活动频繁、生产建设项目多,但部分当地人民环保意识较弱,使得京郊地区的土壤侵蚀问题愈发严重,制约了当地经济、社会的可持续发展^[3]。密云水库位于北京市密云区,是北京市最重要的饮用水源地之一。石匣小流域位于密云水库东北部,处于水库内的一级保护区内,当地的土壤侵蚀问题十分严重,降雨后产生的径流与泥沙是面源污染的主要载体,氮、磷等养分的流失严重影响密云水库库区内的水质,对北京市饮用水安全问题产生了严重的威胁,因此对当地土壤侵蚀与面源污染进行治理已经迫在眉睫。石匣小流域的土壤侵蚀主要发生在坡面,对坡面的土地利用方式进行优化及对水土保持措施的合理配置是当地水土保持工作的关键^[4]。关于对京郊土壤侵蚀的研究,刘宝元等^[5]通过对京郊多年产流产沙观测数据的整理与分析,于 2010 年提出北京土壤流失方程,在防治土壤侵蚀方面取得了显著的成果。也有学者^[4]研究了当地不同水土保持措施下产流产沙对于降雨的响应。笔者认为除了产流产沙外,还应当加大对当地面源污染的研究,以防治密云水库的水质污染问题。

降雨是土壤侵蚀的重要影响因素,是土壤侵蚀的直接驱动力,不同降雨类型与降雨强度对土壤侵蚀的影响不同^[6]。近年来,气候变化加剧,强降雨的发生频率也有所增加,且有研究^[7]表明,严重的土壤侵

蚀主要是由强降雨造成的。之前的学者们大多侧重于对整体降雨的研究,对于强降雨下不同水土保持措施的效果研究相对较少。本研究以石匣水土保持科技示范园内的 10 个径流小区为研究对象,对比分析了 2010—2019 年强降雨条件下的产流产沙及养分流失数据,进而筛选出强降雨条件下水土保持效益最好的水土保持措施配置模式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究试验地位于北京市密云区东北部的石匣小流域,按水系划分隶属于潮白河下游,山系属于燕山山脉,流域总面积为 33 km²(图 1)。依据石匣中心示范区气象站的监测数据,流域多年平均降水量 661.8 mm,属于暖温带季风气候,冬季干燥气温低,夏季潮湿多雨,降水主要集中在夏季,80%以上集中于 6—9 月。该地区属于浅山丘陵区,海拔 150~390 m,地势北部高,南部低,高于 20°的坡面占全流域的 16.2%,岩石类型主要为片麻岩与花岗岩,土壤类型为洪积冲积物母质上发育的褐土,质地为轻壤土,土层较厚,土壤孔隙度较小,耕作层较浅。植被类型以杂草、灌丛为主,覆盖度为 80%。丘陵地带存在的植被多为人工的板栗(*Castanea mollissima* Bl.)、刺槐(*Robina pseudoacacia* Linn.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)及经济林等。土地利用方式主要为林地、坡耕地、草地和裸地。该地区土壤侵蚀模数高于土壤自然形成速度,土壤侵蚀问题严重。

石匣小流域位于密云水库上游一级水源保护区内,当地坡耕地较多,且时常发生强降雨,其严重的土壤侵蚀与面源污染问题对密云水库水质产生严重的影响。因此,为探究该地区小流域综合治理的最佳模式,水利部泥沙中心、北京市水科所等单位 1993 年至今在石匣小流域综合治理实验示范区内陆续共设置 22 个 5 m×10 m 试验小区,对不同的小区布设不同的坡度、坡长与不同水土保持措施。小区中工程措施的布设依据《水土保持综合治理技术规范》^[8]规定:梯田宽度为 4 m;鱼鳞坑规格为 0.5 m×0.5 m;大水平条宽度为 2 m,小水平条宽度为 1 m。坡耕地的耕作

方法按当地传统耕作方法进行,并通过定期清理小区的植被以达到各个小区要求的生物量或植被覆盖度。在当地常用且可推广的水土保持工程措施主要有梯田、水平条、鱼鳞坑,这 3 种措施既有较好的水土保持功效,同时以其廉价的成本被当地居民广泛应用。因

此本文共选取其中 10 个布置了以上 3 种工程措施的径流小区作为研究对象(表 1)。这 10 个小区的配置模式分别为大水平条板栗林、大水平条裸地、荒草地、大水平条玉米坡耕地、自然坡地、鱼鳞坑苜蓿地、小水平条自然坡地、玉米梯田、玉米坡耕地、裸地。

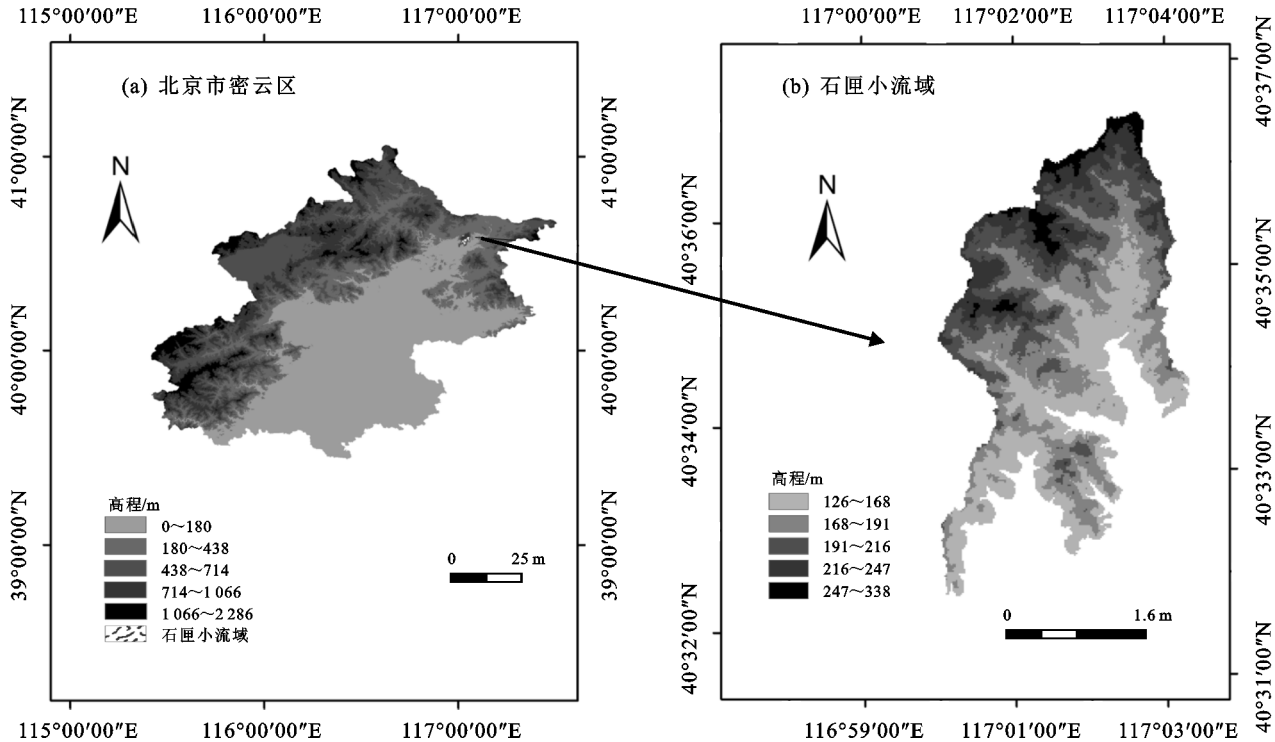


图 1 研究区概况

表 1 径流小区概况

径流小区	坡度/(°)	坡长/m	植被类型	工程措施	配置模式
1	16.5	10	板栗	大水平条 2 m	大水平条板栗林
2	16.5	10	无植被	大水平条 2 m	大水平条裸地
3	14.4	10	荒草地	无	荒草地
4	14.4	10	玉米	大水平条 2 m	大水平条玉米坡耕地
5	27	10	自然坡	无	自然坡地
6	19	10	苜蓿	鱼鳞坑	鱼鳞坑苜蓿地
7	19	10	自然坡	小水平条 1 m	小水平条自然坡地
8	3.5	10	玉米	梯田宽 4 m	玉米梯田
9	3.5	10	玉米	无	玉米坡耕地
10	14.4	10	无植被	无	裸地

1.2 数据采集方法

降雨相关数据的收集采用虹吸式自记雨量计与雨量桶测定,包括降雨量 P (mm)、平均降雨强度 I (mm/h)、降雨历时 T (min)、30 min 内最大雨强 I_{30} (mm/h)与 60 min 内最大雨强 I_{60} (mm/h)。在每次侵蚀性降雨事件发生后 2 h 内测量径流桶与集流桶内的水量即径流量(m^3),并及时收集径流桶中的样品,取样前先将径流桶内泥水混合物搅拌均匀,之后转移至实验室烧杯沉淀并过滤,随后将沉淀物放入电热恒温干燥箱,使其在 105 °C 烘干至恒定重量,称重后得到泥沙量(t)。另外,从径流桶中去径流样品通

过碱性过硫酸钾消解法测定。测定全氮 TN (kg/km^2)、全磷 TP (kg/km^2),通过高锰酸钾滴定法测定化学需氧量 COD (kg/km^2)。

1.3 坡度标准化方法

试验区内各个径流小区处于不同的坡度下,由于坡度是影响土壤侵蚀的重要因素,因此需要将不同坡度小区校正到同一坡度下以消除坡度带来的试验误差,使得试验尽量能在同一条件下进行。选择 15°作为标准坡度,并将其他坡度地块的监测数据转换为 15°进行比较,从而有效消除了坡度对土壤侵蚀的影响。结合以往对坡度标准化和对当地地形特征的研

究,坡度标准化公式^[9]为:

$$S=10.8\sin \theta+0.03 \qquad \theta<5^{\circ}$$
$$S=16.8\sin \theta-0.50 \qquad 5^{\circ}\leq\theta<10^{\circ}$$
$$S=21.91\sin \theta-0.96 \qquad \theta\geq 10^{\circ}$$
$$A_i'=A_i/S_i\times S_{15}$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度($^{\circ}$), A_i' 为第 i 小区校正到 15° 坡度上的侵蚀量(m^3/km^2); A_i 为第 i 小区侵蚀量(t/km^2); S_{15} 为 15° 坡度的坡度因子; S_i 为第 i 小区坡度因子。

2 结果与分析

2.1 石匣小流域 2004—2019 年降雨格局变化

为探究近年来不同等级降雨发生频率的变化,本试验依据当地日降雨量确定小雨、中雨、大雨。其中 24 h 降雨量 $> 50\text{ mm}$ 的为大雨,24 h 降雨量在 $25\sim 50\text{ mm}$ 的为中雨,24 h 降雨量 $< 25\text{ mm}$ 的为小雨。根据此分类标准,对 2004—2019 年发生的 661 次降雨事件进行分类,其中小雨 312 次,中雨 188 次,大雨 161 次(表 2)。2004—2019 年年降雨量与降雨历时呈波动趋势,16 年间平均年降水量为 484 mm 。按照平均值 ± 0.25 分类,2008 年、2010 年、2011 年、2012 年、2013 年、2016 年、2018 年为丰水年,2006 年、2014 年、2015 年、2019 年为正常年,2004 年、2005 年、2009 年、2017 年为干旱年,可以看出从 2010 年后,石匣小流域的雨量为充沛。16 年间降雨历时最长且降雨量最多的年份为 2008 年,年降雨总量达到 598.9 mm ;降雨历时最短且降雨量最小的年份为 2009 年,年降雨总量仅为 331.4 mm 。

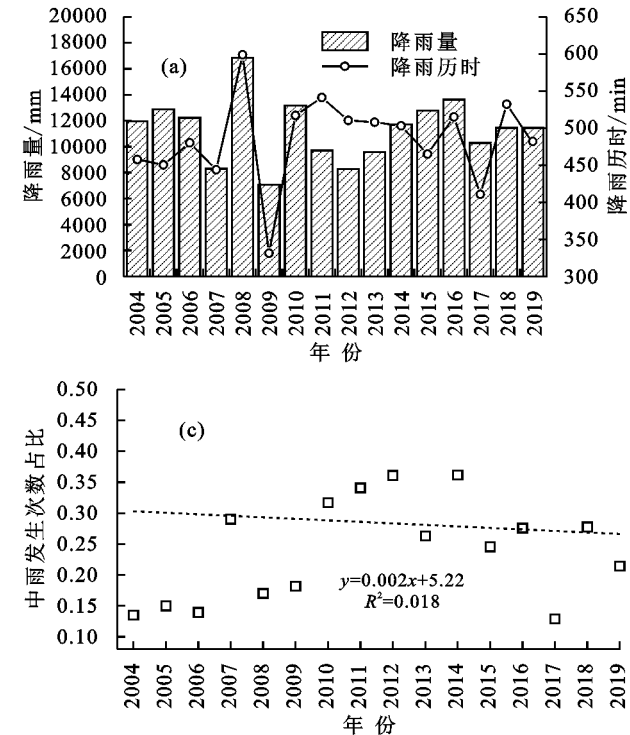


表 2 2004—2019 年石匣小流域降雨基本概况

年份	降雨量/ mm	降雨 历时/min	小雨 次数	中雨 次数	大雨 次数	降雨 总次数
2004	457.9	11960	19	13	5	37
2005	450.3	12880	22	12	6	40
2006	480.2	12225	24	13	6	43
2007	443.9	8295	14	8	9	31
2008	598.9	16851	22	17	8	47
2009	331.4	7060	13	14	6	33
2010	517.0	13168	20	8	13	41
2011	541.3	9708	25	4	15	44
2012	510.3	8282	15	8	13	36
2013	508.0	9583	15	13	10	38
2014	503.0	11724	21	9	17	47
2015	465.0	12761	27	16	14	57
2016	515.0	13624	19	23	16	58
2017	410.8	10289	18	9	4	31
2018	532.2	11437	14	12	10	36
2019	478.9	11454	24	9	9	42

通过分析 2004—2019 年小雨、中雨、大雨的发生频率变化趋势,并分别计算 3 种不同等级降雨在该年的发生次数占当年降雨总次数的比例。由图 2 可知,小雨发生次数最多的年份为 2015 年(27 次),最少的年份为 2009 年(13 次);中雨发生次数最多的年份是 2016 年(23 次),最少的年份是 2011 年(4 次);大雨发生次数最多的年份是 2014 年(17 次),最少的年份为 2017 年(4 次)。从整体来看,16 年间,该地区小雨和中雨的发生频率呈现出轻微下降的趋势,而大雨的频率则呈现出明显的上升趋势。通过对近 16 年降水趋势的分析,可以看出该地区高强度降水呈增加趋势。针对这种情况,应当警惕未来强降雨可能带来的危害,并加大对强降雨下水土保持措施配置模式的研究力度。

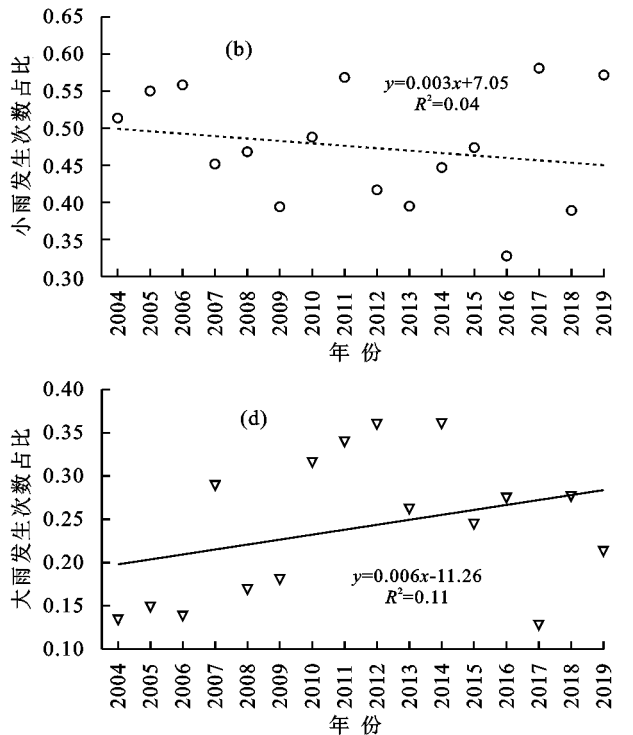


图 2 研究区 2004—2019 降雨格局变化

2.2 强降雨条件

本研究根据石匣小流域当地气象观测数据,选取发生在 2010—2018 年间单次降雨量较大且造成了较严重土壤侵蚀的 19 次降雨事件作为样本,所有样本降雨事件单次降雨量均超过 50 mm,且能够较好地减小前期降雨的影响。通过对比不同配置模式径流小区下的土壤侵蚀与面源污染特征,筛选出当地最适合抵御强降雨的配置模式。由表 3 可知,19 次降

雨事件的平均次降雨量为 76.14 mm,次降雨量的变化范围为 51.30~123.6 mm,降雨历时变化范围为 50.00~1 940.00 min,雨强变化范围为 2.92~69.60 mm/h, I_{30} 的变化范围为 15.20~87.60 mm/h, I_{60} 的变化范围为 10.60~61.70 mm/h。这 19 次样本降雨事件是发生在 2010—2018 年所有降雨事件中降雨量最大的 19 次,因此可以作为该地区强降雨事件的代表。

表 3 样本降雨事件的降雨特征

降雨日期(年-月-日)	降雨量/mm	降雨历时/min	雨强/(mm·h ⁻¹)	I_{30} /(mm·h ⁻¹)	I_{60} /(mm·h ⁻¹)
2010-07-11	67.80	393.00	16.39	45.60	28.00
2010-07-31	71.40	242.00	17.70	68.00	50.50
2010-08-18	61.90	749.00	5.00	22.40	14.00
2011-07-24	105.20	470.00	13.43	59.60	46.40
2012-07-21	123.60	990.00	7.49	38.40	26.80
2012-09-02	69.00	600.00	6.90	16.00	14.50
2013-08-11	57.70	50.00	69.60	18.60	10.60
2013-09-04	62.40	610.00	6.14	29.00	21.80
2013-09-12	55.00	120.00	27.50	56.00	43.00
2014-06-19	86.50	1780.00	2.92	87.60	61.70
2015-07-19	102.80	543.00	11.36	29.60	27.40
2016-06-28	51.30	530.00	5.81	29.20	25.20
2016-07-20	82.50	1615.00	3.07	15.20	14.90
2016-09-04	57.60	370.00	9.34	34.80	26.70
2017-07-06	76.70	910.00	5.06	34.00	20.00
2017-08-22	53.60	1020.00	3.15	23.80	21.90
2018-07-16	108.10	1940.00	3.34	56.00	42.00
2018-07-24	98.50	1580.00	3.74	23.60	14.40
2018-08-12	55.00	440.00	7.50	41.60	21.60

2.3 不同配置模式小区在强降雨事件下产流产沙特征

基于 10 个试验小区在样本降雨下的观测数据,对各个小区的土壤侵蚀特征进行了分析。可以看出,不同配置模式小区的水土保持效益不同。从产流次数(图 3)来看,大水平条板栗林、大水平条玉米坡耕地与裸地在 19 次样本降雨下均产生了侵蚀;大水平条裸地、荒草地、自然坡地和玉米坡耕地的产流次数也相对较多,均为 17~18 次;小水平条自然坡地、玉米梯田、鱼鳞坑苜蓿地的产流次数依次为 12,9,6 次。鱼鳞坑苜蓿地与玉米梯田 2 种配置模式的减流减沙效益较好。

由图 4 可知,不同配置模式小区次降雨事件下平均径流量大小排序依次为裸地>荒草地>大水平条板栗林>自然坡地>玉米坡耕地>大水平条玉米坡耕地>大水平条裸地>小水平条自然坡地>玉米梯田>鱼鳞坑苜蓿地。各个小区径流系数大小的顺序与径流量大小顺序一致。其中平均径流量最小的小区为鱼鳞坑苜蓿地,仅有 3 674.92 m³/km²,其径流系数为 0.05;径流量最大的为裸地,高达 32 194.21 m³/km²,其径流系数为 0.43。裸地径流量为鱼鳞坑苜蓿地的 8.76 倍,减流率为 88.59%,鱼鳞坑加苜蓿这种配置模式在减流方面效果显著,另外玉米梯田对于减流也有较好的作用,其减

流率为 88.40%。各小区平均泥沙量大小排序依次为裸地>大水平条玉米坡耕地>荒草地>大水平条板栗林>自然坡地>大水平条裸地>小水平条自然坡地>鱼鳞坑苜蓿地>玉米坡耕地>玉米梯田。平均泥沙量最大的为裸地,高达 1 188.16 t/km²;泥沙量最小的为玉米梯田,仅有 25.96 t/km²,减沙率为 97.82%。可以看出,玉米梯田的减沙效益较好。

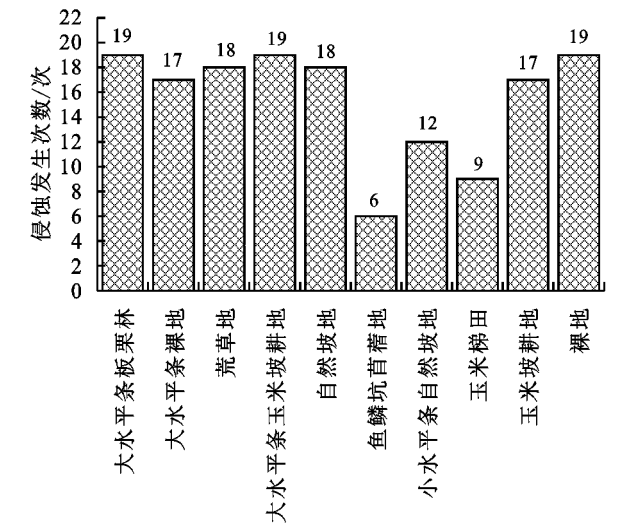
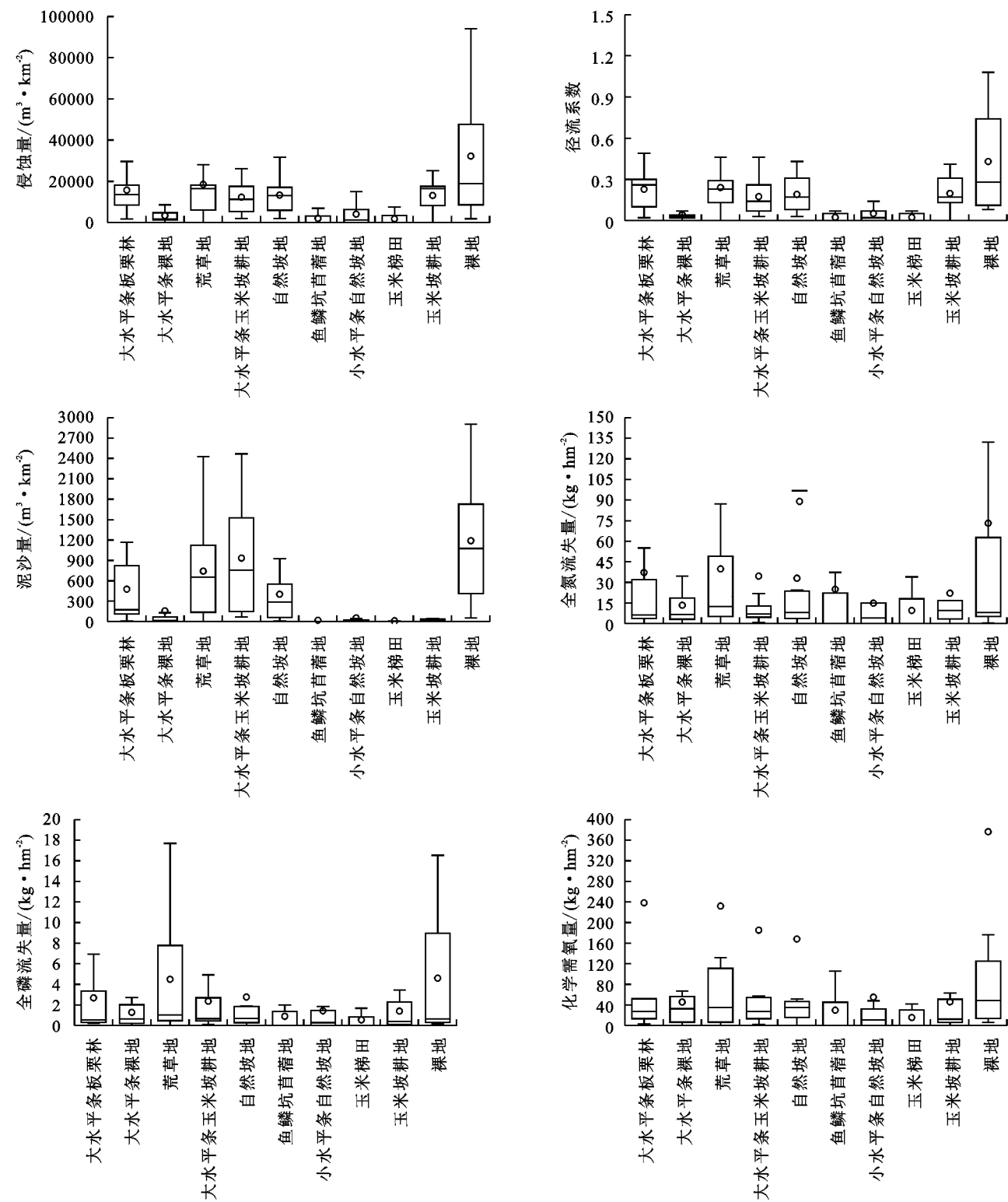


图 3 不同小区在样本降雨下的产流次数



注:图中○表示平均值;框图内一表示中位值。

图 4 不同配置模式小区土壤侵蚀与面源污染特征

2.4 不同配置模式小区在强降雨事件下面源污染特征的对比

除土壤侵蚀相关指标外,氮磷流失量、化学需氧量等面源污染指标也是评价一种配置模式优劣的重要因素。从全氮流失量看,不同小区从大到小依次为裸地>荒草地>大水平条板栗林>大水平条玉米坡耕地>自然坡地>鱼鳞坑苜蓿地>玉米坡耕地>小

水平条自然坡地>大水平条裸地>玉米梯田。裸地在单次降雨下的平均全氮流失量高达 73.09 kg/km^2 ,而玉米梯田仅为 14.93 kg/km^2 ,玉米梯田对全氮流失的减少率为 79.57% 。不同小区全磷流失量从大到小依次为荒草地>裸地>自然坡地>大水平条板栗林>大水平条玉米坡耕地>玉米坡耕地>大水平条裸地>小水平条自然坡地>鱼鳞坑苜蓿地>玉

米梯田。荒草地在单次降雨下的平均全磷流失量高达 4.73 kg/km^2 , 而玉米梯田仅为 1.14 kg/km^2 , 玉米梯田对全磷流失的减少率为 75.90% 。从化学需氧量看, 不同小区从大到小依次为裸地>荒草地>大水平条板栗林>大水平条玉米坡耕地>自然坡地>大水平条裸地>小水平条自然坡地玉米坡耕地>鱼鳞坑苜蓿地>玉米梯田。裸地的化学需氧量为 376.38 kg/km^2 , 玉米梯田的仅为 $32.69\% \text{ kg/km}^2$, 玉米梯田对化学需氧量的减少率为 91.31% 。说明在减轻面源污染方面玉米梯田的作用最为显著。

2.5 强降雨条件下降雨因子对土壤侵蚀与面源污染的影响

由于近年来该地区强降雨发生的频率增加, 因此需要加大对强降雨下水土保持工作的探究。对所有样本小区在样本降雨下土壤侵蚀与面源污染相关因子数值进行了求和(表 4)。结合表 4 降雨数据与土壤侵蚀与面源污染数据, 对所有因子进行相关分析。由表 5 可知, 在样本降雨事件下, 降雨量与径流量呈极显著的相关性, 相关系数分别为 0.608 ; 与径流系数也呈显著的相关性, 相关系数为 0.553 。因此, 强降雨下的降雨量对当地产流情况有较强的影响。另外, 降雨量与泥沙量、TN、TP、COD 的相关系数分别为 $0.357, 0.306, 0.359, 0.201$, 均呈正相关关系。然而降雨历时、雨强与各侵蚀因子、面源污染因子的相关系数较小。 I_{30} 与 I_{60} 的相关性极显著, 相关系数为 0.963 。 I_{30} 与径流量、泥沙量、COD 的相关系数分别为 $0.546, 0.557, 0.530$ 。 I_{60} 与径流量、泥沙量、COD 的相关系数分别为 $0.436, 0.517, 0.503$ 。值得注意的是, I_{30} 、 I_{60} 与径流量、泥沙量、COD 的相关系数均较高, I_{30} 与 I_{60} 对产流产沙及化学需氧量的影响较大。另外, 由 RDA 分析结果(图 5)可知, 降雨量、 I_{30} 、 I_{60} 对小区径流量、泥沙量的影响较大, 降雨强度与降雨历时对产流产沙影响较小。另外, 降雨历时与 I_{60} 对于氮磷流失量与化学需氧量的影响较大。

除降雨因子对土壤侵蚀与面源污染因子的影响外, 土壤侵蚀与面源污染各因子之间也存在一定关系。径流量与泥沙量、径流系数、TN、TP 的相关系数分别为 $0.618, 0.682, 0.342, 0.378$, 其中与泥沙量、径流系数极显著相关。泥沙量与径流系数、TN、TP、COD 的相关系数分别为 $0.394, 0.432, 0.329, 0.305$ 。径流系数与 TN、TP 的相关系数分别为 $0.320, 0.499$, 其中与 TP 显著相关。TN 与 TP、COD 的相关系数分别为 $0.837, 0.445$, 其中与 TP 极显著相关。TP 与 COD 的相关系数为 0.443 。

3 讨论

3.1 京郊降雨格局变化及其未来可能引发的土壤侵蚀问题

降雨是土壤侵蚀的直接动力, 也是影响土壤侵蚀的重要因素, 在开展水土保持工作研究时应当重点考虑当地降雨特征对土壤侵蚀与面源污染的影响。通过分析京郊地区 2004—2019 年降雨格局, 可以看出, 在总降雨量无明显改变的情况下, 小雨、中雨发生的频率有所降低, 而强降雨事件发生的频率有所增加。强降雨事件下的雨滴具有更大的动能, 对地表的打击分散作用更大, 进而造成了更多土壤颗粒的剥离, 一些较细的土壤颗粒填满土壤孔隙形成地表结皮, 阻碍了雨水的下渗, 使得产流产沙量增多^[10]。且相关研究^[11]表明, 占总降雨量比例较低的高强度降雨造成土壤侵蚀的严重程度明显高于降雨量占比较高的较低强度降雨。强降雨除了会造成更严重的土壤侵蚀外, 还更容易诱发山洪、泥石流等灾难事件, 对当地人民生命与财产安全造成了严重威胁^[12]。关于京郊地区降雨格局变化对土壤侵蚀的影响, 有学者^[13]发现, 一定时段内的产沙量随着降雨量的增加而增加, 因此需要对强降雨发生频率的增大格外警惕。

除此之外, 已有研究^[14]表明, 全球范围内降雨强度增大、极端降雨增多等气候问题越来越严重。值得注意的是, 有学者^[15]发现, 未来强降雨事件仍然有增多的可能。因此, 需要加大对强降雨事件的警惕, 并根据当地环境特征来应对强降雨可能造成的潜在问题, 以因地制宜为原则, 通过试验筛选出适合当地环境且具有较好水土保持作用的水土保持措施配置模式, 并加以推广。

3.2 不同水土保持措施配置模式对土壤侵蚀与面源污染的影响

土壤侵蚀的过程十分复杂, 包括雨滴的溅蚀与地表径流冲刷造成的土壤颗粒的剥离、泥沙的运移与沉积并造成土壤养分的流失^[16]。影响土壤侵蚀与面源污染的因子是多方面的, 主要有降雨因子、下垫面因子等^[17-18]。在降雨因子中, 降雨量、降雨强度、 I_{30} 、 I_{60} 对于对土壤侵蚀与面源污染的影响较大, 与产流产沙量、养分流失量呈正相关关系。有研究^[19]发现, 降雨动能 E 与 I_{30} 的乘积 EI_{30} 与土壤流失量相关性较强。这些结果的产生是因为降雨量、降雨强度会影响开始产流的时间及产流后的入渗过程, 另外降雨动能也会影响地表结皮的产生, 尤其是在无保护的裸地, 地表结皮的产生会显著减少雨水的入渗量^[20]。

在坡面水土保持措施中常用的有植被措施与工

程措施,在探究不同配置模式之前需要先明确单一措施对于土壤侵蚀的影响。关于植被措施对土壤侵蚀与面源污染的影响主要有 2 个方面,首先是地上部分植被冠层对降雨的截留作用,植被冠层的截留作用不仅降低了雨滴动能,减轻了土壤溅蚀,同时使一部分被截留的降水蒸发,进而达到水土保持的目的^[21]。除此之外,植物的根系可以改善土壤质量、加固土壤及改善土壤团聚体稳定性进而减轻土壤侵蚀^[22-23]。已有研究^[24]表明,植物光合作用的产物对与土壤有机质含量与土壤稳定性有着决定性作用。因此,可以通过种植植物来提高土壤质量进而达到水土保持的目的。本文通过分析不同水保措施径流小区对降雨的响应,单从有植被措施参与的配置模式来看,苜蓿、板

栗、草、玉米 4 种植被均有一定的水土保持效果,在减轻径流方面的作用大小排序为苜蓿>板栗>草地>玉米,苜蓿在减轻养分流失方面有显著的作用。关于苜蓿的水土保持作用,已有研究^[25]发现,苜蓿对于防治土壤侵蚀与提高土壤质量方面有显著效果。将苜蓿与玉米进行间作不仅可以提高整体饲料产量,同时可以降低生产期间与之后的土壤侵蚀与养分流失,这种方法既保证了当地的经济效益,同时也有一定的水土保持作用^[26]。取得这些结果的原因是苜蓿根部对土壤团聚体稳定性有一定积极影响,提高了土壤的抗剪强度与渗透性。关于苜蓿水土保持作用优于其他植被的原因,可能是其较高的相对干重形成了更为开放的根通道系统,进而提升了土壤的渗透能力^[25]。

表 4 样本降雨下的土壤侵蚀与面源污染特征

降雨日期 (年-月-日)	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	径流 系数	泥沙量/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)	TN/ ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)	TP/ ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)	COD/ ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)
2010-07-11	79295.00	2.17	4753.64	51.76	6.15	121.16
2010-07-31	143745.00	2.01	5891.43	46.42	5.55	359.86
2010-08-18	27528.50	0.67	3640.48	60.22	3.44	178.90
2011-07-24	313752.00	2.98	6804.28	3.31	43.77	229.03
2012-07-21	98968.00	0.80	2093.33	39.86	3.86	209.46
2012-09-02	18677.00	0.27	726.25	21.37	2.32	121.05
2013-08-11	78221.00	1.42	4213.12	57.63	4.00	246.90
2013-09-04	32590.00	0.54	1339.96	28.52	1.71	42.34
2013-09-12	93968.00	1.69	3506.89	45.54	2.84	347.10
2014-06-19	130215.00	1.51	9052.92	746.63	58.72	13546.94
2015-07-19	129168.00	1.26	5757.08	263.27	19.62	503.68
2016-06-28	90955.50	1.77	5138.31	1222.88	63.34	286.87
2016-07-20	58143.50	0.70	792.98	129.96	21.38	497.89
2016-09-04	145668.35	2.53	9702.93	1735.56	110.45	7322.93
2017-07-06	48137.15	0.63	2245.66	86.89	2.65	874.85
2017-08-22	44520.79	0.83	421.26	78.83	2.56	64.21
2018-07-16	244893.85	2.93	5595.29	497.94	18.96	486.02
2018-07-24	256373.93	2.60	1553.38	403.07	20.82	581.06
2018-08-12	186227.84	3.39	2862.60	238.70	34.35	443.17

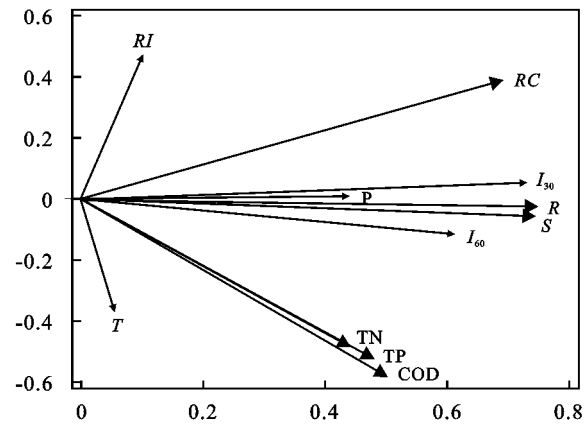
另外,京郊地区实施的工程措施主要有水平条、鱼鳞坑和梯田。本研究发现,这 3 种工程措施参与的配置模式在强降雨下具有一定水土保持作用。王文涛^[13]研究发现,在石匣小流域鱼鳞坑、梯田、水平条与人工种草均具有明显的水土保持效果,认为这 3 种措施具有增加地表入渗、减缓径流的作用。安晨等^[4]通过研究不同土地利用类型产流产沙特征对降雨特征的响应发现,工程措施与植物措施二者结合的水土保持效果更佳。过去的研究在研究对象的选择方面

更多地是对单一水土保持措施进行研究,关于植物措施与工程措施组合的研究相对较少。本研究发现,鱼鳞坑与苜蓿、玉米与梯田组合的配置模式在减轻当地土壤侵蚀与面源污染方面的功效最显著。未来希望能够进一步将植被措施与工程措施中水土保持效果最佳的措施进行组合,进而达到水土保持作用最大化。然而目前关于北京郊区水土保持措施配置模式的相关研究较少,未来应当加大对不同水土保持配置模式的筛选与推广,并进一步揭示其机理。

表 5 降雨因子、土壤侵蚀因子、面源污染因子之间的相关性

相关参数	降雨量	降雨历时	雨强	I_{30}	I_{60}	径流量	泥沙量	径流系数	TN	TP	COD
降雨量	1.000	0.254	0.313	0.238	0.269	0.608 **	0.357	0.553 *	0.306	0.359	0.201
降雨历时		1.000	0.561 *	0.114	0.122	0.114	0.225	-0.138	0.252	0.186	0.320
雨强			1.000	0.076	0.113	0.265	0.053	0.061	0.193	0.253	0.157
I_{30}				1.000	0.963 **	0.546	0.557 *	0.330	0.208	0.217	0.530 *
I_{60}					1.000	0.436	0.517 *	0.287	0.279	0.293	0.503 *
径流量						1.000	0.618 **	0.682 **	0.342	0.378	0.011
泥沙量							1.000	0.394	0.432	0.329	0.305
径流系数								1.000	0.320	0.499 *	-0.106
TN									1.000	0.837 **	0.445
TP										1.000	0.443
COD											1.000

注：* * 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关；* 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。



注:RI 表示平均雨强;RC 表示径流系数;P 表示降雨量;T 表示降雨历时;R 表示径流量;S 表示泥沙量; I_{30} 表示 30 min 内最大雨强; I_{60} 表示 60min 内最大雨强;TN 表示全氮流失量;TP 表示全磷流失量;COD 表示化学需氧量。

图 5 降雨因子对土壤侵蚀与面源污染因子的影响

4 结论

(1)2004—2019 年京郊地区的年降雨量与降雨历时呈无规则波动变化,年降雨量变化范围在 331.4~598.9 mm,平均年降雨量为 484 mm。然而当地的降雨格局发生了较明显的变化,在年总降雨量无明显变化的情况下,小雨、中雨的发生频率有所下降,而大雨的发生频率有所增加。

(2)在强降雨条件下,所有水土保持措施均具有减流减沙、减少养分流失的作用,不同配置模式径流小区的水土保持效益不同。从减缓地表径流的作用来看,表现为鱼鳞坑苜蓿地>玉米梯田>小水平条自然坡地>大水平条裸地>大水平条玉米坡耕地>玉米坡耕地>自然坡地>大水平条板栗林>荒草地>裸地;从减轻泥沙量的作用来看,表现为玉米梯田>玉米坡耕地>鱼鳞坑苜蓿地>小水平条自然坡地>大水平条裸地>自然坡地>大水平条板栗林>

荒草地>大水平条玉米坡耕地>裸地;在减轻氮元素流失作用方面,表现为玉米梯田>大水平条裸地>小水平条自然坡地>玉米坡耕地>鱼鳞坑苜蓿地>自然坡地>大水平条玉米坡耕地>大水平条板栗林>荒草地>裸地;在减轻磷元素流失作用方面,表现为玉米梯田>鱼鳞坑苜蓿地>小水平条自然坡地>大水平条裸地>玉米坡耕地>大水平条玉米坡耕地>大水平条板栗林>自然坡地>裸地>荒草地;在降低化学需氧量作用方面,表现为玉米梯田>鱼鳞坑苜蓿地>玉米坡耕地>小水平条自然坡地>大水平条裸地>自然坡地>大水平条玉米坡耕地>大水平条板栗林>荒草地>裸地。综合来看,鱼鳞坑苜蓿地与玉米梯田在强降雨条件下的水土保持作用最好。

(3)降雨量与径流量、径流系数的相关性较强,在强降雨下,次降雨事件的降雨量对地表径流的产生有较大影响。除此之外,降雨量与泥沙量、TN、TP、COD 均呈正相关关系。 I_{30} 、 I_{60} 与径流量、泥沙量、COD 的相关系数均较高,对产流产沙及化学需氧量的影响较大。降雨历时与 I_{60} 对于氮磷流失量与化学需氧量的影响较大。

参考文献:

[1] 杨顺,潘华利,王钧,等,泥石流监测预警研究现状综述[J].灾害学,2014,29(1):150-156.
[2] Tian Y C, Zhou Y M, Wu B F, et al. Risk assessment of water soil erosion in upper basin of Miyun Reservoir, Beijing, China [J]. Environmental Geology, 2009, 57 (4):937-942.
[3] Zare M, Panagopoulos T, Loures L. Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran [J].Land Use Policy,2017,67:558-572.

- [4] 安晨,方海燕,王奋忠.密云水库上游坡面产流产沙特征及降雨响应:以石匣小流域为例[J].中国水土保持科学,2020,18(5):43-51.
- [5] 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.
- [6] Chamizo S, Rodríguez-Caballero E, Román J R, et al. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall [J].Catena,2017,148:117-125.
- [7] Keo S, 何洪鸣,赵宏飞,等.黄土高原 50 余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):1-7.
- [8] 中国水利部水土保持司.GB/T 16453.1—2008 水土保持综合治理技术规范[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [9] 樊登星,余新晓,贾国栋,等.密云水库上游不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征[J].水土保持通报,2015,35(1):5-8,255.
- [10] Kinnell P I A. Raindrop-induced saltation and the enrichment of sediment discharged from sheet and interrill erosion areas [J].Hydrological Processes,2012,26(10):1449-1456.
- [11] Shi D M, Jiang G Y, Peng X D, et al. Relationship between the periodicity of soil and water loss and erosion-sensitive periods based on temporal distributions of rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir Region, China [J].Catena,2021,202:e105268.
- [12] Borga M, Stoffel M, Marchi L, et al. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows [J].Journal of Hydrology,2014,518:194-205.
- [13] 王文涛.石匣小流域不同水保措施坡面小区产流产沙及污染物输出特征分析[D].北京:北京林业大学,2020.
- [14] Madsen H, Lawrence D, Lang M, et al. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe[J].Journal of Hydrology,2014,519:3634-3650.
- [15] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, et al. The contribution of *Astragalus adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China [J].Land Degradation and Development,2017,28(1):265-273.
- [16] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.
- [17] Nearing M A, Yin S, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity: An historical review [J].Catena,2017,157:357-362.
- [18] Chen H, Zhang X P, Abla M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J].Catena,2018,170:141-149.
- [19] Yin S, Nearing M A, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity: An overview of methodologies and applications [J].Vadose Zone Journal,2017,16(12):1-16.
- [20] Zhang S Y, Zhuo M, Xie Z, et al. Effects of near soil surface components on soil erosion on steep granite red soil colluvial deposits [J].Geoderma,2020,365:e14203.
- [21] Dunkerley D. A review of the effects of throughfall and stemflow on soil properties and soil erosion [J/OL]. Precipitation Partitioning by Vegetation,2020.https://doi.org/10.1007/978-3-030-29702-2_12.
- [22] Lacombe G, Valentin C, Souyafong P, et al. Linking crop structure, throughfall, soil surface conditions, runoff and soil detachment: 10 land uses analyzed in Northern Laos [J].Science of the Total Environment,2018,616:1330-1338.
- [23] Liu H F, Wang X K, Liang C T, et al. Glomalin-related soil protein affects soil aggregation and recovery of soil nutrient following natural revegetation on the Loess Plateau [J].Geoderma,2020,357:e113921.
- [24] Poirier V, Roumet C, Munson A D. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes [J].Soil Biology and Biochemistry,2018,120:246-259.
- [25] Osterholz W R, Renz M J, Jokela W E, et al. Interseeded alfalfa reduces soil and nutrient runoff losses during and after corn silage production [J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,74(1):85-90.
- [26] Zhang S Y, Zhuo M, Xie Z, et al. Effects of near soil surface components on soil erosion on steep granite red soil colluvial deposits [J]. Geoderma, 2020, 365: e114203.