

沟坡侵蚀汇水区黑土水分和养分的空间异质性

祁志¹, 丁超¹, 韩兴¹, 张兴义²

(1. 吉林农业大学 资源与环境学院, 吉林, 长春 130118; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要: [目的] 研究坡耕地侵蚀沟汇水区土壤水分和养分空间差异性及其变化, 揭示黑土侵蚀对坡耕地粮食生产的影响。[方法] 选取典型黑土坡耕地发育的侵蚀沟汇水区为研究区域, 系统观测全生育期土壤水分和养分性状, 并秋收测产, 解析黑土水分、养分、产量空间异质性及其相关性, 分析沟坡侵蚀对土壤质量和作物生产力的影响。[结果] ①沟坡侵蚀对黑土坡耕地土壤水分性状造成了显著的影响, 全生育期表层0—20 cm 垄沟土壤含水量变异系数12.2%~17.4%, 为中等变异; 块金值/基台值 < 0.2 , 表明具有强烈的空间相关性, 雨季块金值/基台值近为0, 表明沟坡汇水区土壤含水量完全因地形等结构因子导致的径流迁移的影响, 空间有效相关距离最小, 为55.2 m。②沟坡汇水区土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量变化分别为23.9~49.7, 0.8~1.7, 0.3~0.6 g/kg, 和70.3~183.8, 27.8~78.9, 71.2~202.1 mg/kg, 土壤有机质含量有效空间相关距离小于100 m, 全磷含量有效空间相关距离最大, 接近500 m。③汇水区大豆产量变化1 669~3 223 kg/hm², 玉米产量变化8 177~10 871 kg/hm²。[结论] 沟坡侵蚀加剧了汇水区土壤水分和养分空间异质性, 降低了耕地生产力。

关键词: 黑土; 汇水区; 土壤水分; 养分; 作物产量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0079-09

中图分类号: S157.2, S153

文献参数: 祁志, 丁超, 韩兴, 等. 沟坡侵蚀汇水区黑土水分和养分的空间异质性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 79-87. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.013; Qi Zhi, Ding Chao, Han Xing, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture and nutrients in valley-slope erosion watershed in black soil area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 79-87.

Spatial Heterogeneity of Soil Moisture and Nutrients in Valley-Slope Erosion Watershed in Black Soil Area

Qi Zhi¹, Ding Chao¹, Han Xing¹, Zhang Xingyi²

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract: [Objective] The spatial variations of the soil moisture content and soil nutrient content in an eroded gully catchment of sloping farmland were explored to reveal the effects of black soil erosion on the grain production of sloping farmland. [Methods] The erosion gully catchment area of a typical black-soil sloping farmland region was selected as the study area. Field experiments were conducted to systematically observe the soil moisture properties and soil nutrient content during the entire growth period. The soybean and maize yields were also measured during the autumn. The spatial heterogeneity and correlation between the soil moisture content, soil nutrient content, and soybean and maize yields were determined, and the effects of gully erosion on the soil quality and crop productivity were analyzed. [Results] ① Gully-slope erosion had a significant effect on the soil moisture content of the black soil in the sloping land. The coefficient of variation of the soil moisture content at a depth of 0—20 cm in ridge and furrow soils ranged from 12.2% to 17.4% (i. e., of a medium level), and the nugget/sill was 0.2. There was a strong spatial correlation, and the nugget/

收稿日期: 2020-06-25

修回日期: 2020-07-14

资助项目: 国家重点研发计划项目“侵蚀沟复垦关键技术研发与技术体系构建”(2017YFC0504200); 国家自然科学基金项目“坡耕地水土保持措施下黑土有机碳演变研究”(41571264)

第一作者: 祁志(1996—), 男(汉族), 江苏省扬中市人, 硕士研究生, 研究方向为黑土区水土保持。Email: 1803342464@qq.com。

通讯作者: 张兴义(1966—), 男(汉族), 黑龙江省密山市人, 博士, 研究员, 主要从事黑土侵蚀与水土保持研究。Email: zhangxy@iga.ac.cn。

sill was close to 0 during the rainy season. This indicated that the soil moisture content in the catchment area was strongly affected by the runoff migration caused by the topography and other structural factors. The spatial effective correlation distance was relatively small (55.2 m). ② The contents of soil organic matter, total nitrogen (N), total phosphorus (P), alkali-hydrolyzed N, available P, and available potassium (K) were 23.9~49.7 g/kg, 0.8~1.7 g/kg, 0.3~0.6 g/kg, 70.3~183.8 mg/kg, 27.8~78.9 mg/kg, and 71.2~202.1 mg/kg, respectively. The effective spatial correlation distance of soil organic matter content was < 100 m, and the maximum effective spatial correlation distance of the total P content was close to 500 m. ③ The soybean and maize yields varied from 1 669 to 3 223 kg/hm² and from 8 177 to 10 871 kg/hm², respectively. [Conclusion] Gully-slope erosion aggravates the spatial heterogeneity of the soil moisture and nutrient contents in the watershed, and also reduces the productivity of cultivated land.

Keywords: black soil; watershed; soil moisture; soil nutrient; crop yield

作为中国粮食主产区和最大的商品粮基地,东北黑土区同时也是中国水土流失最为严重的区域^[1],坡面和沟道侵蚀均较为严重,水土流失主要发生于已垦坡耕地上,成为当前危害东北黑土粮食可持续生产的主要因素^[2]。东北黑土侵蚀研究近年来得以重视,研究主要集中于黑土侵蚀特征、过程及其驱动机制上^[3-4],黑土水土流失危害领域主要侧重于坡面侵蚀速率,即黑土层变薄速率^[5],黑土坡耕地土壤质量演变、水分胁迫、养分流失等,及其对作物产量的影响^[6]。研究方法多采取典型坡面、小流域土壤性状的空间异质性及其变化,比较土壤性状改变与作物产量的空间关系解析土壤侵蚀对粮食生产的影响^[7]。

黑土区水土流失严重的坡耕地,坡面侵蚀多伴随着沟道侵蚀,以黑龙江省为例,95%的侵蚀沟形成发育于坡耕地上^[8],研究发现,黑土沟道侵蚀具有显著增加侵蚀强度的作用^[8]。沟坡耦合侵蚀对坡耕地土壤质量和作物产量的影响鲜有报道。本研究在典型漫川漫岗黑土区选取沟坡侵蚀汇水区为研究对象,系统测定土壤水分及其季节性变化,测定土壤养分及作物产量,通过空间异质性分析,解析水土流失导致的土壤水分和养分空间变化对全坡面作物产量的影响,旨在为黑土水土流失危害评估和水土保持生态建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于黑龙江省海伦市光荣村,东北典型黑土区中部,商品粮核心产区,地理坐标为 47°21′22.52″N, 126°49′56.71″E。属于中温带大陆性气候,四季分明,降水集中,近 90%集中在 5—9 月份。多年平均降雨 530 mm,年均气温 1.5℃。光荣村属漫川漫岗典型水土流失区,垦殖率 80%,坡耕地占 90%以上,平均坡度为 2.55°,主要作物为大豆和玉米,一年一季,旋

耕垄作,大豆的施肥量为 250 kg/hm²,玉米的施肥量为 400 kg/hm²,追肥量为 250 kg/hm²,土壤为典型黑土^[9]。

试验区为中部沿坡向发育侵蚀沟所在坡面的汇水区,面积 8.06 hm²,平均坡度 3.84°,横坡垄作,横向条带种植大豆和玉米。侵蚀沟属发育于横坡垄作的耕地中的小型切沟,长 180 m,平均宽 3 m,深 1.5 m,切沟上端与两条分叉的浅沟相连,浅沟长各约 100 m,延伸到分水岭处,沟尾与横向交叉的一条中型沟连接,2017 年秋收后利用秸秆填埋对切沟进行复垦^[10]。

1.2 测定指标及方法

地形图绘制与汇水区划定。汇水区内布设 5 个控制点,用 RTK 测定控制点三维地理坐标信息后,利用无人机 50 m 高度低空摄影,图片重叠率 70%,由 Pix 4D 软件处理图像,使用 ArcGIS 软件对生成的 DEM 等值线处理,获得研究区域汇水区的 1:2 000 等高线,手动圈出汇水区,并计算汇水区面积^[11]。

汇水区测定样点的确定。2019 年春季播种前,坡面汇水区横向间隔设置 6 行测定点,每行原沟道处设置 2 个测点,作为性状比较的对照,原沟道线汇水区内左右最高点各设置 1 个测点,原沟道线和最高点间设置一个测定点,汇水区共布设 33 个测定点,利用 RTK(中海达)测定每个测定点空间坐标,并计算样点间的空间距离(见图 1)。

土壤性状的测定。分别于 2019 年 5 月 11 日,6 月 15 日,8 月 15 日,9 月 11 日使用环刀法分别测定样点垄沟 0—20 cm 土层的土壤体积含水量、饱和含水量、田间持水量^[12];同步采集垄沟 0—20 cm 的混合土样,用于测定土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量。有机质含量使用德国产的 Multi N/C 2100 S 分析仪测定,全氮使用采用半微量开氏法测定,全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测

定,碱解氮采用氢氧化钠—硼酸扩散法测定,速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾采用 NH_4OAc 浸提法测定。

作物产量测定。汇水区涉及多个农户,条带种植大豆和玉米。分别在沟头、沟中、沟尾横向条带所对应的坡上、坡中、坡下位,收获前测定玉米和大豆籽实产量。

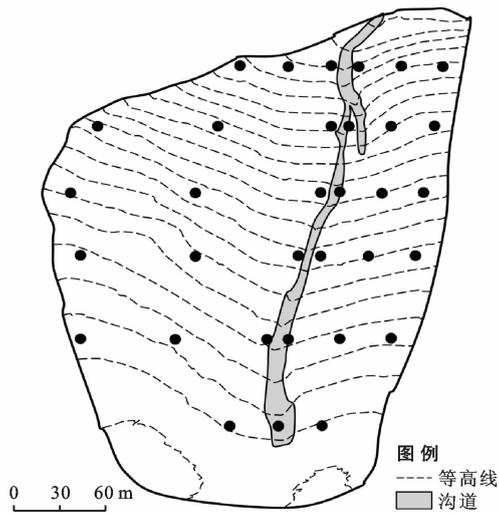


图 1 汇水区采样点分布

1.3 数据处理及分析

通过 RTK 提供地理坐标结合无人机摄影,使用 ArcGIS 软件获得汇水区的等高线和汇水区二维平面图,使用 $\text{GS}^+ 5.3 \text{ b}$ 对测定数据进行半方差函数分析并进行 Kriging 差值绘图,利用 Excel 软件进行经典统计学分析。

2 结果与分析

2.1 汇水区土壤水分性状空间异质性

(1) 经典统计学变化分析。沟坡汇水区不同时期垄沟的土壤体积分含水量的变异性均属于中等变异 ($10\% < C_v < 75\%$, 见表 1)。6 月之前,坡耕地土壤含水量的变化范围为 $17.1\% \sim 29.1\%$,其分布不均匀是由原土体水分的差异以及春季土壤融化下层反浆水和两场 20 mm 的降雨所导致(见图 2);6 月末进入雨季,主要受地表径流的影响,土壤含水量的变化范围为 $18.6\% \sim 32.6\%$,较春季的差异增加,主要是水流失所致。

沟坡汇水区土壤持水保水性能也具有显著的空间差异。春季土壤田间持水量的范围在 $26.3\% \sim 40.1\%$,雨季变为 $24.4\% \sim 40.0\%$,土壤田间持水量由 8 月 15 日之前的弱变异 ($C_v < 10\%$) 变为之后的中等变异,是由于春季耕作整地及中耕使得表层土壤疏松,田间持水量变化趋小,降雨促使土壤回实加之径流冲刷,导致变化增大。

土壤饱和含水量表明土壤最大储水能力,汇水区也存在着较大的变异。春季汇水区垄沟土壤饱和含水量的范围为 $28.8\% \sim 46.3\%$,雨季变为 $26.1\% \sim 43.1\%$,除 6 月 15 日之外汇水区土壤饱和含水量均属于中等变异,6 月 15 日垄沟土壤饱和含水量由中等变异转为弱变异,可能的原因是连续 3 次的中耕均是在垄沟实施,疏松土壤所致;此后由进入雨季,降雨次数、雨量和雨强等增加,发生水土流失,导致土壤回实,容重增加,导致坡耕地汇水区各个位置土壤孔隙差异变大,垄沟土壤饱和含水量差异变大。

表 1 2019 年研究区沟坡侵蚀汇水区垄沟土壤水分

日期	体积含水量			田间持水量			饱和持水量		
	平均值/%	范围/%	变异系数 C_v	平均值/%	范围/%	变异系数 C_v	平均值/%	范围/%	变异系数 C_v
0511	22.5	17.1~29.1	14.2	31.1	26.3~40.1	9.5	35.3	28.8~46.3	13.1
0615	23.3	17.9~29.5	12.2	31.8	26.9~37.1	8.6	34.6	28.1~43.5	9.7
0815	25.2	18.6~32.6	13.2	32.5	24.4~40.0	10.3	35.3	26.1~43.1	11.8
0911	23.5	17.2~31.7	17.4	31.7	26.0~39.3	12.5	34.1	27.6~44.4	14.0

(2) 地统计学空间异质性分析。地统计学分析可很好地揭示了汇水区土壤水分的空间异质性及其时空演变特征。汇水区垄沟土壤体积分含水量的半变异函数最佳理论模型主要是球状模型,块金值/基台值的范围为 $0.001 \sim 0.198$,均小于 0.25,说明土壤体积分含水量受到人为活动干扰较小,具有强烈的空间自相关性。

全生育期块金值/基台值先降低再升高,雨季后期 8 月 15 日比值接近为 0,空间相关性最强,说明垄沟土壤含水量只是受地形地貌等结构性因子导致的水土流失影响,有效空间自相关距离变程最小,为 52.2 m ,雨季结束作物接近成熟的 9 月 11 日,块金值/基台值恢复到春季水平,受结构性因子影响降低,有效空间自相关距离增大到 468.6 m (见表 2)。

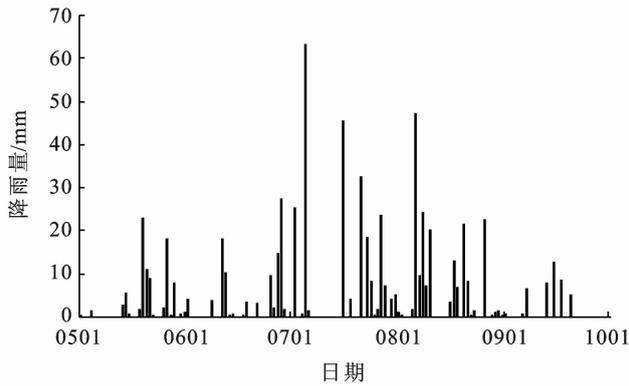


图 2 2019 年研究区降雨量

汇水区垄沟土壤田间持水量的半变异函数最佳理论模型主要是指指数模型,苗期 5 月 11 日块金值/基台值为 0.497,表明变量具有中等的空间相关性,受人类活动引起的随机因子和自然因素决定的结构因子影响各占 50%,空间有效相关距离最大,为 510.9 m,主要是收秋整地、播种等农耕作对表层土壤频繁扰动,降低了垄沟土壤田间持水量的空间异质性。其他时期块金值/基台值均为 0.001,变量具有强烈的空间相关性,几乎完全受自然因素决定的结构因子影响,空间有效相关距离在 18.7~45.8 m,主要是降雨导致土壤自然回实以及水土流失共同作用,加大了垄沟土壤田间持水量的空间异质性。

表 2 汇水区垄沟土壤性状半变异函数理论模型及相应参数

土壤性状	日期	最佳模型	块金值/基台值	变程/m	决定系数 R^2
体积含水量/%	0511	球状模型	0.179	83.3	0.814
	0615	指数模型	0.083	77.1	0.779
	0815	球状模型	0.001	52.2	0.697
	0911	高斯模型	0.198	468.6	0.802
田间持水量/%	0511	指数模型	0.497	510.9	0.025
	0615	球状模型	0.001	45.8	0.69
	0815	高斯模型	0.001	35.7	0.878
	0911	指数模型	0.001	18.7	0.578
饱和持水量/%	0511	指数模型	0.001	22.1	0.483
	0615	指数模型	0.001	43.4	0.751
	0815	指数模型	0.003	40.5	0.739
	0911	指数模型	0.202	55.8	0.633

汇水区垄沟土壤饱和含水量的半变异函数最佳理论模型各时期均为指数模型,块金值/基台值的变化与土壤田间持水量相反,除成熟期 9 月 11 日为 0.202 外,其余时期均小于 0.003,块金值/基台值小于 0.25,说明垄沟土壤饱和含水量受到人为干扰较小,变量具有强烈的空间相关性,主要受结构性因子

影响,水土流失加剧了其空间相关性,空间相关距离较小,为 22.1~55.8 m。

利用地统计学对土壤水分性状进行了空间插值,绘制了 4 个观测期性状的空间分布(见图 3)。汇水区垄沟土壤体积含水量、田间持水量、饱和含水量均表现为 5 月和 6 月份坡上与坡下汇水线处含量较高,8 月和 9 月坡下汇水线处含量较高。主要是受水土流失长期作用导致土壤和水分迁移再分配所致,东北黑土区坡耕地水土流失总体表现为坡中土壤侵蚀最重,坡上相对坡度较缓,土壤侵蚀较轻,坡下多为土壤沉积^[12]。8 月和 9 月雨季降水抵达地表后,形成地表径流并向坡下和沟道中汇集,导致坡下汇水线处水分含量较高。

2.2 汇水区土壤养分空间异质性

(1) 经典统计学变化分析。沟坡汇水区不同时期垄沟的土壤养分的变异性见表 3。土壤有机质含量具有显著的变异。春季土壤有机质含量的范围在 32.3~47.9 g/kg,雨季变为 23.9~49.7 g/kg,土壤有机质含量由 6 月 15 日之前的弱变异变为之后的中等变异,是由于 6 月 15 日之后,雨季到来,降雨次数、雨量和雨强等增加,发生水土流失,导致土壤有机质的迁移,变化增大。沟坡汇水区土壤全氮含量同样变异较大,春季土壤全氮含量范围为 1.0~1.3 g/kg,雨季变为 0.8~1.5 g/kg,由 6 月 15 日之前的弱变异变为之后的中等变异,也是由于雨季水土流失导致土壤氮随径流和土壤迁移,全氮含量的变化增大。沟坡汇水区土壤全磷含量整体变化范围变化较小,春季全磷含量的变化范围为 0.3~0.6 g/kg,雨季为 0.3~0.5 g/kg,均属于中等变异,说明分布不均匀,水土流失导致土壤磷的迁移是造成全磷含量分布不均的原因之一。

沟坡汇水区土壤有效养分氮磷钾含量变化较大。土壤碱解氮含量整个生育期均属于中等变异,春季范围为 91.9~154.3 mg/kg,雨季为 77.2~139.7 mg/kg。由于汇水区坡耕地涉及多个农户,种植作物为玉米和大豆,施肥量不同,因此施肥不均和作物氮素利用不同是除水土流失外导致土壤碱解氮含量的差异的重要原因,雨季碱解氮含量整体降低是这 3 种因素共同作用的结果。沟坡汇水区土壤速效磷含量,春季范围为 30.3~45.9 mg/kg,雨季为 29.1~74.0 mg/kg,由 6 月 15 日之前的弱变异变为之后的中等变异,表明水土流失对土壤速效磷的影响较大。沟坡汇水区土壤速效钾含量,春季范围为 91.4~161.8 mg/kg,雨季为 81.3~171.9 mg/kg,均属于中等变异,受种植作物、施肥量和水土流失等共同影响。

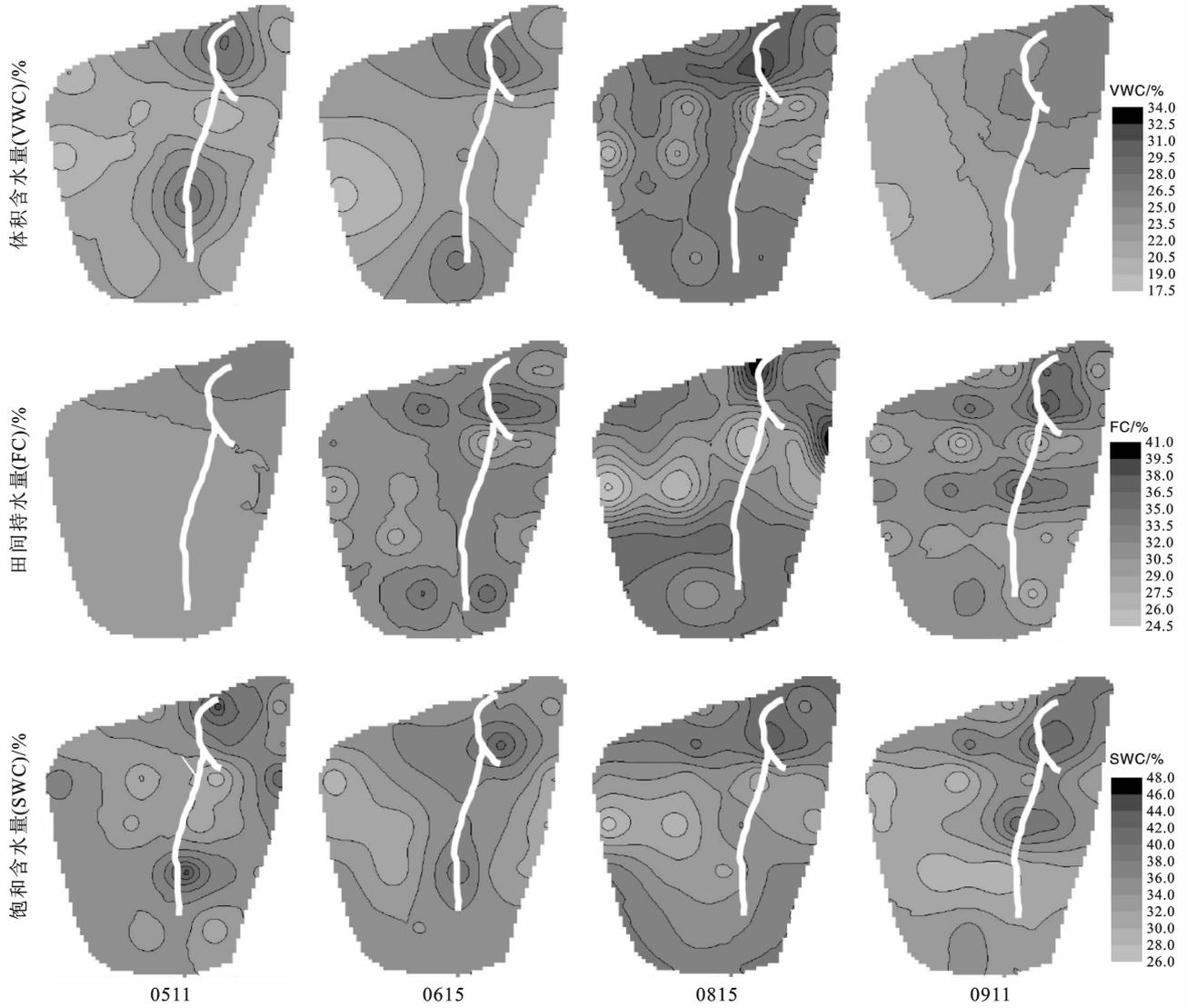


图 3 研究区沟坡侵蚀汇水区土壤水分性状空间分布及其季节变化

表 3 研究区沟坡侵蚀汇水区垄沟土壤养分

日期	项目	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
0511	平均值	39.0	1.2	0.4	121.9	37.0	123.8
	范围	32.3~47.9	1.0~1.3	0.3~0.6	91.9~154.3	30.3~45.9	91.4~161.8
	变异系数 C _v /%	8.8	8.2	13.6	13.3	9.3	13.7
0615	平均值	38.0	1.3	0.4	125.2	59.0	142.3
	范围	29.4~49.4	0.9~1.7	0.3~0.5	80.3~183.8	42.0~78.9	91.4~202.1
	变异系数 C _v /%	12.2	17.5	11.0	17.6	19.6	22.3
0815	平均值	38.7	1.2	0.4	111.7	47.1	115.7
	范围	23.9~49.7	0.8~1.5	0.3~0.5	77.2~139.7	29.1~74.0	81.3~171.9
	变异系数 C _v /%	13.6	16.5	10.6	15.6	27.0	23.0
0911	平均值	38.6	1.2	0.4	104.9	41.8	108.3
	范围	24.6~44.4	0.8~1.6	0.3~0.5	70.3~134.9	27.8~57.1	71.2~152.2
	变异系数 C _v /%	13.7	16.2	13.2	15.7	22.2	21.1

(2) 地统计学空间异质性分析。如表 4 所示,地统计学分析表明汇水区土壤有机质和养分含量具有

显著的空间异质性。汇水区垄沟土壤有机质含量的半变异函数最佳理论模型主要是球状模型和指数模型,

块金值/基台值的范围为 0.001~0.003,接近于 0,具有强烈的空间相关性,说明土壤有机质含量空间变化几乎不受人类土壤耕作、作物种植和施肥等人类活动影响,完全受地形地貌等结构因子导致的水土流失的影响,有效空间自相关距离较小,为 21.7~71.3 m。汇水区垄沟土壤全氮的半变异函数最佳理论模型主要是球状模型,块金值/基台值的范围为 0.001~0.267,春季 5 月 11 日和 6 月 15 日块金值/基台值为 0.001,接近于 0,具有强烈的空间相关性,说明土壤全氮含量只受地形地貌等结构因子的影响,空间有效距离分别为 23.8 m 和 87.3 m;雨季后期 8 月 15 日块金值/基台值为 0.267,变量的空间相关性由强烈转变为中等,受人类活动影响的加大,随机因子和自然因素决定的结构因子的影响分别占 26%和 74%,空间有效距离为 49.4 m;雨季结束的 9 月 11 日块金值/基台值降低,变为 0.025,变量回升到强烈的空间相关性,有效空间自相关距离增大到 93.2 m。汇水区垄沟土壤全磷的半变异函数最佳理论模型主要是指指数模型,块金值/基台值的范围为 0.077~0.201,均小于 0.25,说明土壤全磷受到人为活动干扰较小,具有强烈的空间自相关性;全生育期块金值/基台值呈下降趋势,有效空间相关距离呈先下降后升高的趋势,春季为 477.3~487.7 m,雨季后期 8 月 15 日减小为 87.1 m,雨季结束的 9 月 11 日又增加到 510.9 m。

汇水区垄沟土壤碱解氮的半变异函数最佳理论模型各时期均是球状模型,块金值/基台值的范围为 0.001~0.131,均小于 0.25,说明土壤碱解氮受到人为活动干扰较小,具有强烈的空间自相关性。苗期 5 月 11 日块金值/基台值为 0.001,接近于 0,具有强烈的空间相关性,说明土壤碱解氮含量只受地形地貌等结构因子的影响,空间有效距离为 69.7 m;雨季初期 6 月 15 日块金值/基台值升高为 0.131,空间有效距离增加至 90.8 m;雨季后期 8 月 15 日和雨季结束 9 月 11 日,块金值/基台值恢复至春季水平,均为 0.001,空间有效距离下降为 63.9~66.1 m。汇水区垄沟土壤速效磷的半变异函数最佳理论模型主要是球状模型,块金值/基台值的范围为 0.001~0.072,块金值/基台值小于 0.25,说明土壤速效磷受人为活动干扰影响也较小,空间自相关性较强;苗期 5 月 11 日块金值/基台值为 0.001,接近于 0,具有强烈的空间相关性,说明土壤速效磷含量只受地形地貌等结构因子的影响,空间有效距离为 65.8 m;雨季初期 6 月 15 日块金值/基台值升高为 0.072,空间有效距离增加至 84.3 m;雨季后期 8 月 15 日块金值/基台值下降为 0.027,空间有效距离增加至 146.8 m;雨季结束

9 月 11 日块金值/基台值和空间有效距离均恢复至春季水平。汇水区垄沟土壤速效钾的半变异函数最佳理论模型主要是球状模型,块金值/基台值的范围为 0.003~0.011,块金值/基台值小于 0.25,具有强烈的空间相关性,说明土壤速效钾受到人为活动干扰较小,主要受地形地貌等结构因子的影响;苗期 5 月 11 日块金值/基台值为 0.005,接近于 0,说明土壤速效钾含量只空间有效距离为 71.0 m;雨季初期 6 月 15 日和后期 8 月 15 日块金值/基台值上升为 0.011,空间有效距离增加至 149.6~510.0 m;雨季结束 9 月 11 日块金值/基台值恢复至春季水平,为 0.005,空间有效距离下降为 22.6 m。

表 4 汇水区垄沟土壤性态半变异函数理论模型及相应参数

土壤性状	日期	最佳模型	块金值/基台值	变程/m	决定系数 R^2
有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	0511	球状模型	0.001	65.8	0.838
	0615	指数模型	0.001	23.4	0.467
	0815	指数模型	0.003	21.7	0.259
	0911	球状模型	0.001	71.3	0.448
全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	0511	指数模型	0.001	23.8	0.584
	0615	球状模型	0.001	87.3	0.843
	0815	高斯模型	0.267	49.4	0.632
	0911	球状模型	0.025	93.2	0.892
全磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)	0511	指数模型	0.201	487.7	0.821
	0615	高斯模型	0.111	477.3	0.856
	0815	指数模型	0.131	87.1	0.718
	0911	指数模型	0.077	510.9	0.891
碱解氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	0511	球状模型	0.001	69.7	0.601
	0615	球状模型	0.131	90.8	0.719
	0815	球状模型	0.001	63.9	0.546
	0911	球状模型	0.001	66.1	0.618
速效磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	0511	球状模型	0.001	65.8	0.838
	0615	高斯模型	0.072	84.3	0.877
	0815	指数模型	0.027	146.8	0.817
	0911	球状模型	0.004	82.3	0.793
速效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	0511	球状模型	0.005	71.0	0.608
	0615	球状模型	0.011	149.6	0.713
	0815	球状模型	0.011	510.0	0.862
	0911	指数模型	0.003	22.6	0.458

利用地统计学对土壤养分性状进行了空间插值,绘制了 4 个观测期性状的空间分布图(见图 4)。汇水区垄沟土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量均表现为 5 月分布相对均匀,6 月坡上和坡下汇水线处含量较高,8 月和 9 月坡下汇水线处含量较高,主要是受水土流失长期作用,雨季降雨抵达地表形成地表径流,向坡下和汇水线处汇集,土壤养分随径流迁移,部分随径流流入河道造成养分流失,导致 8 月和 9 月养分含量总体低于 5 月。

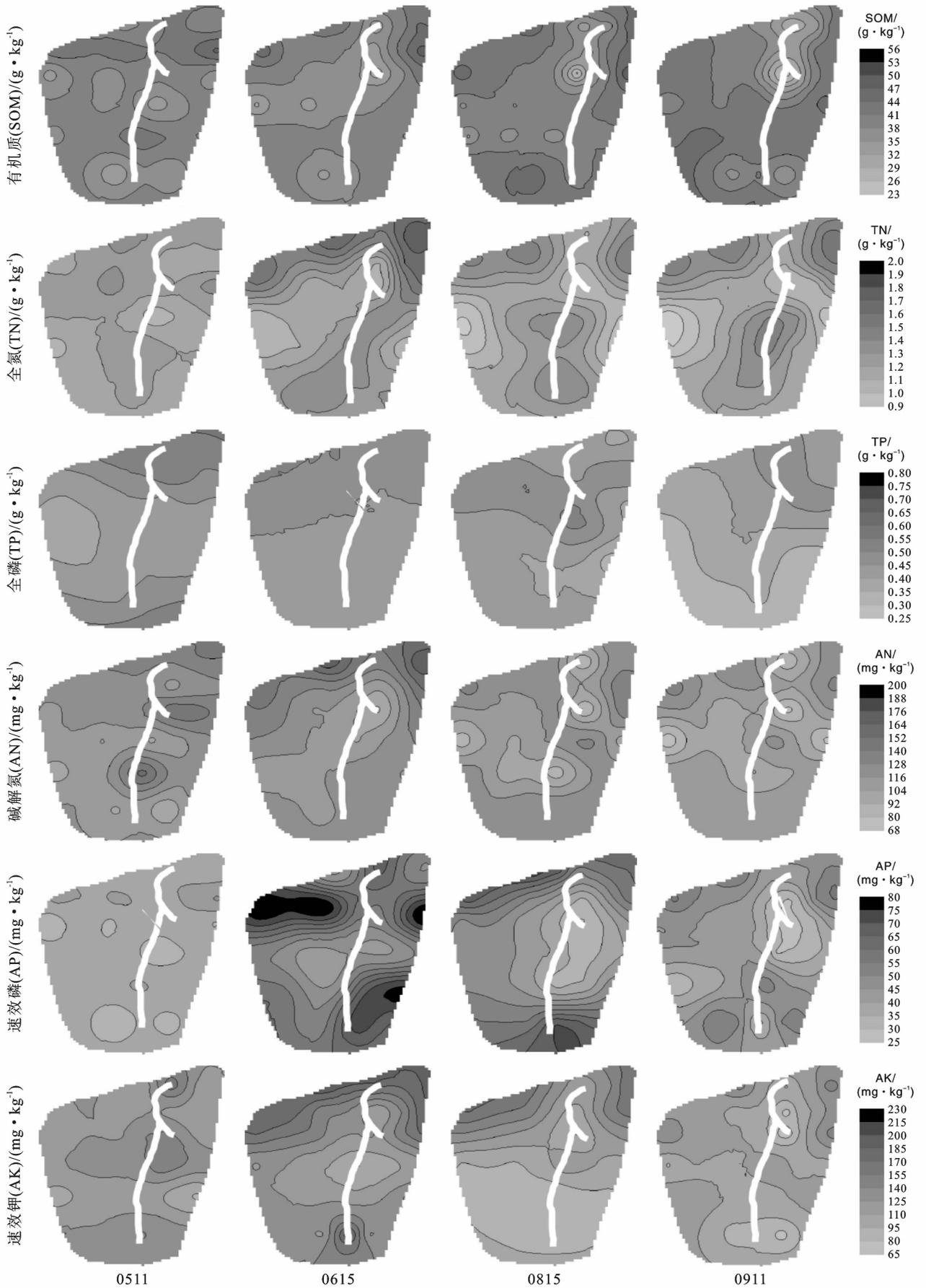


图 4 研究区沟坡侵蚀汇水区土壤养分性状空间分布及其季节变化

2.3 对作物的影响

如表 5 所示,坡耕地汇水区涉及 7 户农户,3 户种植大豆,4 户种植玉米,作物种类和品种之间都有较大差异,不能纵向比较坡上、坡中、坡下的产量,只能横向比较相同垄上的同一作物产量。在同一条垄上,汇水线附近的作物产量高于沟坡处作物产量,大豆产量表现为:上游横向沟坡较较汇水线附近耕地减产 6.7%;中游横向沟坡较坡中耕地减产 6.2%;下游横向沟坡较汇水线附近耕地减产 37.3%;玉米产量:与大豆相似的位置分别减产 7.7%,12.9%和 19.9%。

相同作物,上游沟坡位的产量与其横向对应汇水线附近的产量差距较小,主要是上游横向地势变化较小,即横向坡度较缓,其位置生长的作物与同一条垄上作物的生长环境相似,养分与水分含量差距较小,因此,产量相差小;中游沟坡的作物产量明显低于横向对应汇水线耕地的作物产量,主要是由于横向坡度较陡,径流沿垄沟横向向沟线汇集,表层土壤被冲走,养分流失,导致作物产量差异增大。下游沟坡的作物产量也明显低于汇水线附近的作物产量,是由于下游沟道侵蚀最为严重,水土流失导致的土壤水分和养分的迁移所致。

表 5 研究区浅沟不同位置沟坡与耕地产量 kg/hm^2

位置和类型	大豆	玉米
上游沟坡	3 007	10 038
中游沟坡	2 600	9 020
下游沟坡	1 669	8 177
上游耕地	3 223	10 357
中游耕地	2 769	10 871
下游耕地	2 661	10 210

3 讨论

坡耕地汇水区为横坡垄作,垄间距 70 cm,垄台比垄沟高 20 cm,虽然横坡垄作能有效降低水土流失^[13],但由于汇水区中部存在凹型微地形,雨季径流汇集于汇水线,长期的冲刷造成沟道形成与发育,沟道侵蚀发生后,坡面沿垄向径流流速、冲刷动能均增加,导致水土流失加剧,即沟道侵蚀加速坡面侵蚀^[14]。

坡耕地汇水区土壤水分空间异质性强,且存在季节差异,通过实测发现春季土壤体积含水量的最高值是最低值的 1.7 倍,雨季变为 1.75 倍;春季土壤田间持水量的最高值是最低值的 1.5 倍,雨季变为 1.65 倍;春季土壤饱和含水量的最高值是最低值的 1.6

倍,雨季变为 1.65 倍;主要是因为雨季土壤的入渗速率下降(见图 5),随着降雨次数、雨强、雨量增加(见图 2),径流量增大,土壤水分随径流发生迁移,水分空间分布发生变化。

坡耕地汇水区土壤养分空间异质性强,且存在季节差异,通过实测发现春季土壤有机质含量的最高值是最低值的 1.48 倍,雨季变为 2 倍;春季土壤全氮含量的最高值是最低值的 1.3 倍,雨季变为 1.9 倍;春季土壤全磷含量的最高值是最低值的 2 倍,雨季变为 1.7 倍;春季土壤碱解氮含量的最高值是最低值的 1.7 倍,雨季变为 1.8 倍;春季土壤速效磷含量的最高值是最低值的 1.5 倍,雨季变为 2.5 倍;春季土壤速效钾含量的最高值是最低值的 1.8 倍,雨季变为 2.1 倍;土壤速效养分主要受自然地形地貌、降雨等结构性因子影响大,这些结构性因子造成汇水区沟道侵蚀与坡面侵蚀,沟道侵蚀与坡面侵蚀造成水土流失,养分随径流和土壤迁移,养分空间分布发生变化。沟坡侵蚀加剧坡耕地水分、养分空间异质性。

整个坡耕地汇水区的土壤水分和养分的空间异质性强,主要体现在两个方面,首先汇水区沟道附近耕地与坡面耕地土壤水分和养分分布不均,其次,坡上、坡中、坡下土壤水分和养分分布不均。研究区为横坡垄作,地表径流主要沿垄沟向中部的沟道汇水线汇集,然后再沿汇水线沿坡向向下汇流,流出田块。坡位不同,其坡度不同,径流不同,其导致的结果是水分、养分多集中于沟坡处,汇水区沟道附近耕地与坡面耕地水分、养分含量差异较大,导致坡耕地汇水区空间异质性增大;而坡上、坡中、坡下总体的水分、养分含量存在差异,导致坡上、坡中、坡下总体空间异质性变化,且坡上、坡中、坡下的空间异质性随着季节的变化而变化,土壤水分和养分表现出相似的规律,5—6 月坡上与坡下含量较高,8 月和 9 月坡下含量较高,导致不同时间段坡上、坡中、坡下的空间异质性存在差异。

整个坡耕地汇水区的作物产量也受到沟坡侵蚀的影响,玉米最高产量是最低产量的 1.9 倍,大豆最高产量是最低产量的 1.3 倍,是由于沟坡侵蚀对坡耕地汇水区造成水土流失,使得汇水区的水分、养分含量分布不均,最终作物产量下降。

横坡垄作虽是坡面很好的水土保持措施,由于存在微地形,汇水区易发生沟道侵蚀,沟道侵蚀会加速坡面侵蚀,导致坡耕地土壤质量下降,水分胁迫,最终造成作物减产,因此坡耕地水土流失需沟坡同步治理。

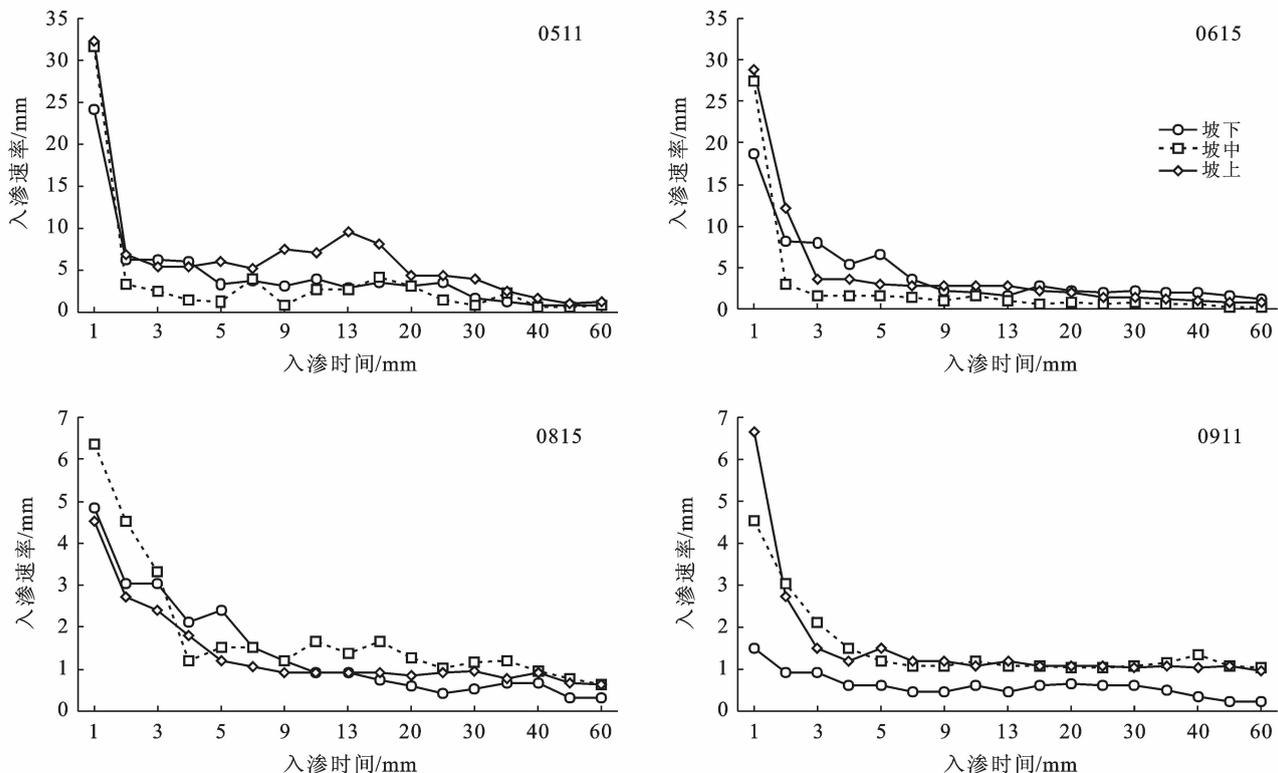


图 5 研究区沟坡侵蚀汇水区不同位置入渗速率及季节变化

4 结论

(1) 沟坡侵蚀对黑土坡耕地土壤水分性状造成了显著的影响。土壤含水量变异系数为 12.2%~17.4%，其中以 9 月份差异最大，范围为 17.2%~31.7%，以坡下汇水线处的含量最高，坡中汇水线处的含量最低。同时对土壤持水性能也造成了影响，土壤田间持水量变化范围为 26.0%~39.3%，土壤饱和含水量变化范围为 27.6%~44.4%，以坡下汇水线处的含量最高，坡上汇水线处的含量最低。

(2) 沟坡侵蚀对黑土坡耕地土壤养分也造成了显著的空间差异。土壤有机质含量的变异系数为 8.8%~13.7%，其中以 9 月份差异最大，范围为 24.6~44.4 g/kg，以坡下汇水线处的含量最高，坡上汇水线处的含量最低；土壤全氮含量的变异系数为 8.2%~17.5%，其中以 6 月份差异最大，范围为 0.9~1.7 g/kg，以坡下汇水线处的含量最高，坡中汇水线处的含量最低；土壤全磷含量的变异系数为 10.6%~13.6%，其中以 5 月份差异最大，范围为 0.3~0.6 g/kg，以坡上、坡下汇水线处的含量最高，坡中汇水线处的含量最低；土壤速效养分的变异系数为 9.3%~27.0%，均以 8 月份差异最大，碱解氮、速效磷、速效钾的范围分别为 77.2~139.7 mg/kg, 29.1~74.0 mg/kg, 81.3~171.9 mg/kg，以坡下汇水线处的含量最高，

坡上汇水线处的含量最低。

(3) 沟坡侵蚀汇水区土壤水分和养分空间异质性，最终导致作物产量的差异。大豆和玉米产量变化范围分别为 1 669~3 223 kg/hm², 8 177~10 871 kg/hm²，大豆玉米的最低产量均出现在下游沟坡处，沟坡侵蚀对大豆产量的影响大于玉米。单纯等高垄作，由于受微地形变化的影响，不能完全阻止水土流失，应采取秸秆覆盖等水土保持措施。

[参 考 文 献]

[1] 王计磊, 李子忠. 东北黑土区水力侵蚀研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 389-397.
 [2] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.
 [3] 郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 314-319.
 [4] 张兴义, 刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 340-344.
 [5] 桑琦明, 王磊, 郑粉莉, 等. 东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 73-78.
 [6] 张兴义, 孟令钦, 刘晓冰, 等. 黑土区水土流失对玉米干物质积累及产量的影响[J]. 中国水利, 2007(22): 47-49.

- 2241-2247.
- [7] 陈程,陈明. 环境重金属污染的危害与修复[J]. 环境保护, 2010, 38(3): 55-57.
- [8] 何强,潘伟亮,王书敏,等. 山地城市典型硬化下垫面暴雨径流初期冲刷研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 959-964.
- [9] 何强,彭述娟,王书敏,等. 不同下垫面暴雨径流氮赋存形态分布特性及控制技术[J]. 土木建筑与环境工程, 2012(5): 141-147.
- [10] 李贺,张雪,高海鹰,等. 高速公路路面雨水径流污染特征分析[J]. 中国环境科学, 2008, 28(11): 1037-1041.
- [11] Janardhana Raju N, Shukla U K, Ram P. Hydrogeochemistry for the assessment of groundwater quality in Varanasi: A fast-urbanizing center in Uttar Pradesh, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173(1/2/3/4): 279-300.
- [12] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (Volume I): Human Health Evaluation Manual (Part E): Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment [Z]. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2004.
- [13] Xiao Jun, Wang Lingqing, Deng Li, et al. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 650(Part 2): 2004-2012.
- [14] 张科峰,李贺,傅大放,等. 3种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 724-730.
- [15] 黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等. 澳门城市路面地表径流特征分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 469-473.
- [16] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123(2): 134-143.
- [17] Helmreich B, Hilliges R, Schriewer A, et al. Runoff pollutants of a highly trafficked urban road: Correlation analysis and seasonal influences [J]. Chemosphere, 2010, 80(9): 991-997.
- [18] 王书敏,何强,艾海男,等. 山地城市暴雨径流污染特性及控制对策[J]. 环境工程学报, 2012, 6(5): 1445-1450.
- [19] 张千千,王效科,郝丽岭,等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 76-82.
- [20] Todd D K, Mays L W. Groundwater hydrology edition [M]. New York: Wiley, 1980: 23-25.

(上接第87页)

- [7] 张兴义,王其存,隋跃宇,等. 黑土坡耕地土壤湿度时空演变及其与大豆产量空间相关性分析[J]. 土壤, 2006, 38(4): 410-416.
- [8] 唐莉,孟令钦,张锋. 黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2): 819-821, 827.
- [9] 李浩,张兴义,刘爽,等. 典型黑土区村级尺度侵蚀沟演变[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 21-28.
- [10] 张兴义,祁志,张晟旻,等. 东北黑土区农田侵蚀沟填埋复垦工程技术[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 128-135.
- [11] 张兴义,甄怀才, James R M, 等. 基于 PhotoScan 的径流小区三维重建参数优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 144-150, 230.
- [12] 李朝英,郑路. 利用环刀法测定土壤水分精度的影响因素[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 118-123.
- [13] 张少良,张兴义,刘晓冰,等. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 11-15.
- [14] 李士文,吴景才. 黑土侵蚀区土壤侵蚀演变规律及对策[J]. 中国水土保持, 1989(4): 7-10.