

基于GIS的水土保持措施下坡耕地 土壤养分变异特征

李海强¹, 郭成久¹, 李勇²

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866; 2. 桓仁满族自治县水土保持站, 辽宁 桓仁 117200)

摘要:以水保林地、水平梯田及地埂植物带组成的水土保持措施体系和无措施坡耕地土壤养分为研究对象,利用GPS定点采样,传统统计分析和ArcGIS地统计分析相结合,并通过参数及误差值对比,选取最佳空间插值拟合模型(球状模型),研究水土保持措施体系和无措施坡耕地土壤养分的空间变异特征。结果表明:(1)5个指标的空间变异度对比:TP>有效P>TN>有机质>pH,其TN,TP,有效P,pH值的空间变异受水土保持措施影响显著,有机质不仅受非人为因素影响,也受人为因素影响。(2)运用Kriging插值制图显示,5个指标在空间上分布均不均匀。采取水土保持措施后对土壤养分有一定的富集作用,含量显著高于无措施对照区;无措施坡耕地坡上、坡中和坡下部位土壤养分呈规律性降低趋势。而土壤pH值空间变异与有机质,TN,TP和有效P相反。(3)上坡位的水保林地对TN,TP和有机质的拦蓄作用最好,中坡位的水平梯田对有效P的拦蓄作用显著;由于下坡位的无措施对照区作为土壤养分流失的必经区域,土壤养分含量较高,表现出地埂植物带对养分的拦蓄作用不显著。通过土壤pH值的空间对比发现,种植相应植物使水保林地和地埂植物带土壤pH值下降了。

关键词:水土保持措施;土壤养分;ArcGIS;空间插值

中图分类号:S152.71

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0043-06

Variation Characteristics of Soil Nutrients in Sloping Farmland With Measures of Soil and Water Conservation Based on GIS

LI Haiqiang¹, GUO Chengjiu¹, LI Yong²

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Soil and Water Conservation Station of Huanren Manchu Autonomous County, Huanren, Liaoning 117200, China)

Abstract: We selected soil nutrient in soil and water conservation measures system composed of water conservation forest, level terrace and terrace plants and no measures slope farmland as the research sample. We used GPS to locate the sampling point and combined traditional statistical analysis and ArcGIS's statistical analysis, compared the parameters and error values, and selected the best spatial interpolation model (spherical model) to study soil nutrient spatial variability in soil and water conservation measures system and no measures slope farmland. The results showed as follows. (1) The spatial variability of five indicators follows the order: TP>available P>TN>organic matter>pH, the spatial variabilities of TN, TP, available P and pH are significantly affected by soil and water conservation measures, while organic matter is impacted not only by non-human factors but also by human factors. (2) The use of Kriging interpolation mapping shows that the five indicators unevenly distributed in the space. The content of soil nutrient resulting from taking conservation measures was significantly higher than that of the control area. From the top of the hill to the bottom of the slope, soil nutrient decreased regularity under no measure. The spatial variation of soil pH was opposite to that of organic matter, TN, TP and available P. (3) Soil and water conservation forest interception effects on TN, TP and organic matter are the best, and the interception effect of level terrace of P is significant. As a result of no control area as a necessary sink part of the lost soil nutrients, soil nutrient content was high in this area, showing that ridge plants have no significant effect on nutrient retention. With

regard to pH in space, the corresponding planting plants make soil pH value of in water conservation forest and ridge plant belt decrease.

Keywords: soil and water conservation measures; soil nutrient; ArcGIS; spatial interpolation

坡耕地土壤养分的流失不仅造成土壤肥力降低、土地生产力下降,而且面源污染物会引起下游水体富营养化,给人们的生产和生活带来了诸多不便。为此,许多学者研究了不同措施对坡耕地土壤养分流失的防控作用。有学者研究表明增加植被覆盖度能够减少氮、磷的流失量,但是增加植被覆盖在有效减少 TN 流失的同时,会造成土壤矿质氮的流失^[1-2],因此在防治土壤养分流失过程中,不仅要增加植被覆盖度,而且可采取水土保持工程措施,通过改造耕地地形而减少土壤养分的流失。为了有效控制东北黑土区坡地面源污染物以径流泥沙方式的流失^[3],在黑土区占地 59% 的坡耕地可修筑各种不同水土保持措施。冯洋等^[4]曾研究表明采取水土保持措施后的土壤 TP 和 TN 的含量显著高于未采取水土保持措施坡耕地土壤 TP 和 TN 含量。近些年,随着 GIS 技术在水土保持方面逐渐成熟,使土壤养分流失的监测和评价更为方便、简易。雷能忠等^[5]研究表明,利用 GIS 的 Kriging 插值与栅格叠加功能和地统计学方法进行土壤养分质量评价能较客观地反映土壤养分状况。运用 GIS 空间分析功能,通过 GIS 软件显示制图,可绘制面源污染物污染指数图,从而清晰表现污染的空间分布和变异情况^[6]。结合 RUSLE 模型^[7],利用 GIS 可确定土壤的 N、P 流失情况^[8-9],且通过 GIS 空间插值法可对研究区域径流水体和土壤 N、P 含量空间分布规律、释放特征进行研究,从而分析土壤中 N、P 的迁移转化规律。但利用 GIS 技术对东北黑土区建设有水土保持措施体系的坡耕地土壤养分变化规律的研究较少,因此本文运用 GIS 空间插值方法,分析整个水土保持措施体系下坡耕地土壤有机质、N、P 含量空间上的变化特征,完成研究区整个水土保持措施体系对坡耕地土壤养分变化的影响评价,从而缓解由

水土流失造成的下游水体富营养化,减少面源污染,改善生态环境,为遏制坡耕地养分流失、改善小流域水质提供参考依据与技术保障。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验选择辽宁省本溪市桓仁满族自治县浑江流域雅河乡大泉眼小流域为典型试验区,地理位置位于东经 125°15′25″,北纬 41°11′24″。雅河乡大泉眼小流域位于桓仁县南部,属浑江流域,流域内有一条河流大泉眼河,全长 6.5 km,汇入浑江。流域面积 28.67 km²,水土流失面积 956.5 hm²,水土流失面积占总面积的 33.36%。雅河乡大泉眼小流域属长白山系龙岗支脉的中低山区,流域内最高海拔为 753 m,地貌属低山丘陵区,气候为北温带半湿润大陆性季风气候,年平均降水量 808.8 mm,年均蒸发量 1 282.3 mm,每年 7—9 月为暴雨集中期,其降雨量约占全年的 69.3%。流域内种植的主要作物为玉米 (*Zea mays*)。研究区水土保持措施体系上坡位水土保持林植被以红松 (*Pinus koraiensis*) 和落叶松 (*Larix spp*) 为主;中坡位水平梯田田面净宽为 8 m,田坎高度 1.45 m;下坡位地埂植物带栽植紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* L.),株行距 20 cm×20 cm。

1.2 试验设计

本试验选取 2015 年该流域降雨较多且农事管理活动较频繁的 3—9 月份逐月采样,同时,根据研究区已经修建完善的水土保持措施体系(从坡顶到坡底的水土保持措施依次是水保林地、水平梯田、地埂植物带)的实际情况,选择同一坡面上相应高度无措施坡耕地作为对照区,水土保持体系与无措施坡耕地基本情况见表 1。

表 1 研究区基本情况

坡位	措施	坡度/(°)	主要植被	土地面积	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)
上坡位	水保林地	15~20	红松、落叶松、杂草	70	23.41	2.26	0.29	23.75
	无措施	15~20	玉米	50	18.41	1.60	0.20	18.47
中坡位	水平梯田	10~15	玉米	4	24.59	2.19	0.37	28.09
	无措施	10~15	玉米	3	19.78	1.89	0.27	22.39
下坡位	地埂植物带	10~15	玉米、紫穗槐	9	22.87	2.43	0.43	26.01
	无措施	10~15	玉米	7	21.59	2.32	0.26	24.24

为了满足 GIS 对空间插值布设点的要求,又结合各水土保持措施的布设情况,水土保持林内顺坡设置 10 个

“S”形,共 50 个采样点,分 0—15 cm 和 15—30 cm 层,分层取样,即 100 个土样;从坡上至坡下等距选取 4 个水平梯

田,每个梯田内顺田面按“S”形设置 7 个采样点,共 28 个采样点,即 56 个土样;地埂植物带内横坡设置 3 个“S”形,共 15 个采样点,30 个土样;无措施顺坡设置 4 个“S”形,共 28 个采样点,56 个土样。每次对研究区域设置的 121 个采样点,用精准 RTK 定位仪和手持 GPS 同时测点定位,并以定位点为中心选取 2 m×2 m 样方,先剔除表土中的动植物残体、砾石,然后每个样方内按九宫格交叉取 5 个重复样品充分均匀混合为 1 个样品,并分纵向深度 0—15 cm 和 15—30 cm 两个层次共采集 242 个土样,带回实验室处理。样品自然风干后,选取四分法取样,用钵碾磨成粉末,过不同孔径筛后来测定土壤有机质、TN、TP,有效 P 和 pH 值等数据。本研究主要选取 3 月份 0—15 cm 土层深土壤养分测定数据作为本底值(表 1),暴雨较为集中的 8 月份数据作为研究数据源。

土壤有机质的测定方法采用重铬酸钾容量法(GB9834—88),TN 采用开氏消煮—常量蒸馏—纳氏试剂光度法(GB7173—87),TP 采样浓硫酸—高氯酸高温消解—钼锑抗比色法(GB9837—88),有效 P 采用紫外分光光度法测试,土壤 pH 采用电位法。

1.3 数据统计分析

本试验采用 Excel 和 SPSS 17.0 软件统计数据

并作相关性分析,采用 ArcGIS 10.0 进行数据检验及空间插值作图。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤养分含量描述性统计分析

在整个研究区内,不同水保措施及无措施对土壤养分含量影响不同,采取水土保持措施后对土壤养分有一定的富集作用。其 TN 含量范围为 1.92~3.00 g/kg,TP 含量范围为 0.15~0.53 g/kg,有机质含量范围为 23.14~30.14 g/kg,有效 P 含量范围为 17.65~49.27 mg/kg,pH 值变化范围为 5.71~6.39,且 TN、TP、有机质和有效 P 的最小值均出现在无措施坡耕地,最大值分别出现在水保林地、地埂植物带、地埂植物带和水平梯田。土壤 TP、有效 P、TN、有机质和 pH 值的空间变异度分别为 25.39%、21.58%、11.50%、7.04%、3.25%。同一研究区域其土壤母质的变化较小,因此土壤 pH 值变异系数最小;由于研究区人们采取秸秆还田,因此,有机质和 TN 的空间变异较小。土壤 TP 和有效 P 空间变异度较高,可能与人们的施肥管理习惯及磷素本身在土壤中的流动性较小有关。

表 2 各个指标间的相关性分析

指标	项目	pH	有效磷	全磷	全氮	有机质	水保措施
水保措施	Pearson 相关性	−0.688**	0.401**	0.308**	0.371**	0.740**	1
	显著性(双侧)	0.000	0.008	0.004	0.000	0.000	
有机质	Pearson 相关性	−0.293**	0.629	0.298	0.822**	1	
	显著性(双侧)	0.007	0.000	0.006	0.000		
全氮	Pearson 相关性	−0.342**	0.261	−0.009	1		
	显著性(双侧)	0.001	0.016	0.937			
全磷	Pearson 相关性	−0.009	0.444**	1			
	显著性(双侧)	0.932	0.000				
有效磷	Pearson 相关性	0.146	1				
	显著性(双侧)	0.184					
pH	Pearson 相关性	1					
	显著性(双侧)						

* *. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* . 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

从表 2 可看出,水土保持措施对土壤有机质、TN、TP、有效 P、pH 均有较大影响,各指标均与水保措施呈极显著相关。pH 值与水土保持措施之间呈极显著负相关,这主要受水土保持林地和地埂植物带植被影响,由于整个水土保持体系已于 2012 年完成建设,体系内植物逐渐对生长土壤理化性质有所改善,使水保林地土壤 pH 值有所下降,从而表现为有措施比无措施 pH 值大;土壤有机质主要是土壤氮素的存在场地,受到土壤 pH 值的影响,其 pH 值与有机质和全氮均呈极显著相关。磷素在土壤中流动性弱,使磷素与水保措施的相关性显

著。有机质和全氮呈极显著正相关,相关系数达到 0.822,说明研究区内土壤有机质和 TN 含量关系密切。有效 P 作为磷素养分供应水平高低的一个重要表征^[10],与 TP 呈极显著正相关关系。

2.2 土壤特性的空间变异模型建立

通过数据检验发现,土壤 TN、TP、有机质含量和 pH 值的原始采样数据呈正态分布;有效 P 含量采样数据在经过对数变换处理后,呈正态分布,符合插值要求。研究中空间插值选取普通克里金法,但插值过程中参数的设置及拟合模型选取不同均会导致插

值结果不同,从而影响评价结论。

表 3 是选取普通克里金法进行插值过程中设置不同拟合模型和其预测误差值对比情况。5 个指标所选拟合模型 ME 的绝对值和 MSE 均较接近 0;而所选三种模型全 P 的 RMSSE>1,说明在预测过程中,低估了

预测值,且高斯模型中有机质的 RMSSE 也大于 1;根据 RMSE 越小越好的原则,高斯模型拟合造成的 RMSE 相对较小。但通过表 3 中 ME, RMSE, ASE, RMSSE, MSE 和经验函数综合对比分析,最终选取球状模型作为本试验最佳插值拟合模型。

表 3 半方差函数拟合模型误差值对比

模型类型	指标	平均值	均方根	标准平均值	标准均方根	平均标准误差	经验函数
球状	全氮	-0.001	0.212	-0.011	0.880	0.218	$0.649x+0.870$
	全磷	0.001	0.036	0.016	1.253	0.029	$0.935x+0.020$
	有机质	0.001	1.006	-0.002	1.000	0.023	$0.840x+4.323$
	有效磷	0.048	3.292	0.009	0.947	0.499	$0.817x+5.368$
	pH	-0.001	0.108	-0.004	0.902	0.122	$0.762x+1.466$
指数	全氮	0.001	0.210	-0.001	0.899	0.218	$0.648x+0.879$
	全磷	0.001	0.036	0.022	1.012	0.036	$0.927x+0.023$
	有机质	-0.001	1.025	-0.004	0.901	0.143	$0.805x+5.277$
	有效磷	0.050	3.262	0.015	0.900	0.644	$0.801x+5.885$
	pH	-0.002	0.108	-0.008	0.894	0.125	$0.745x+1.574$
高斯	全氮	0.003	0.205	-0.000	0.964	0.229	$0.670x+0.823$
	全磷	-0.001	0.036	-0.024	1.162	0.031	$0.891x+0.035$
	有机质	0.010	0.998	0.006	1.010	0.023	$0.844x+4.234$
	有效磷	0.062	3.386	0.007	0.965	0.579	$0.775x+6.517$
	pH	-0.002	0.112	-0.008	0.903	0.127	$0.713x+1.769$

通过对 5 个指标进行球状模型拟合,同时可利用半变异曲线图得出参数,其基本值和各个指标的球状模型公式见表 4。球面模型公式为:

$$r(h)=\begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0+C\left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] & 0<h<a \\ C_0+C & h\geq a \end{cases}$$

式中: C_0 为块金值,表示由随机变量带来的空间变异; C 为偏基台值,表示基台值与块金值的差值; a 为变程,表示样点间距的上限; h 为样点间距。

从表 4 可知,5 个试验指标拟合过程中块金值(C_0)均小于变程 a ,说明试验中任意两个采样点之间存在相关性。 $C_0/(C_0+C)$ 值可以表明各个指标的空间相关程度。当 $C_0/(C_0+C)<25\%$,表示有强烈空间相关

性,这种空间变异是非人为因素造成的;当 $25\leq C_0/(C_0+C)<75\%$,表示有中等空间相关性;当 $C_0/(C_0+C)\geq 75\%$,表示空间相关性较弱,这种空间变异主要是人为因素导致的。通过 $C_0/(C_0+C)$ 值的对比表明,有机质的空间相关度大于 25%,说明空间相关性处于中等程度,这主要是除水保林地之外,水平梯田、地埂植物带和无措施对照区均有人为活动的参与,因此,有机质的空间变异不仅受到自然环境的影响,还受到人类耕作管理的影响,但其 $C_0/(C_0+C)$ 较接近 25%,说明其受到人为影响较小。土壤 TN, TP, 有效 P, pH 值的 $C_0/(C_0+C)$ 均小于 25%,说明它们的空间变异基本是非人为因素导致的。综上分析表明,本试验所研究的土壤有机质, TN, TP, 有效 P 和 pH 值的空间变异主要是采取水土保持措施所造成的。

表 4 各个指标球面模型函数基本值及公式

指标	模型类型	C_0	C	$C_0/(C_0+C)$	变程/m	$r(h)$		
						$h=0$	$0<h<a$	$h\geq a$
全氮	球状	0.007	0.048	0.125	183.480	0	$0.007+0.024[3(h/183.480)-(h/183.480)^3]$	0.055
全磷	球状	0.000	0.007	0.006	528.300	0	$0.004+0.003[3(h/928.300)-(h/928.300)^3]$	0.007
有机质	球状	0.475	1.357	0.259	231.620	0	$0.475+0.679[3(h/931.620)-(h/931.620)^3]$	1.833
有效磷	球状	0.003	0.025	0.100	98.470	0	$0.003+0.012[3(h/498.470)-(h/498.470)^3]$	0.028
pH	球状	0.005	0.030	0.152	466.500	0	$0.005+0.015[3(h/466.500)-(h/466.500)^3]$	0.035

2.3 不同土壤特性空间分布

2.3.1 研究区各个指标空间分布特征 图1是研究区降雨较集中的8月份土壤有机质, TN, TP, 有效P和pH值的空间分布。5个指标在空间上分布均不均匀。总体空间分布特征:水土保持措施体系土壤有机质, TN, TP和有效P含量比无措施高, 而土壤pH值空间变异与有机质, TN, TP和有效P相反。

研究区无措施坡耕地有机质, TN, TP和有效P均呈现带状分布, 且从坡上、坡中至坡下有机质、TN和有效P含量依次增高, 但全P呈现坡中>坡下>坡上, 与贺小容等^[11]研究结果一致。有机质和有效P在水土保持体系内从坡上到坡底顺坡呈条带状, 这表明在暴雨情形下, 采取水土保持措施对水保林地、水平梯田和地埂植物带中心部位有机质和有效P流失缓解作用大于其四周。水土保持措施体系和无措施坡耕地TN均在坡下部达到最高。与贺小容等^[11]研究结果不同的是, 在水土保持措施体系内, 水保林地内TP坡上部较高, 坡下部较低, 而地埂植物带内呈坡下>坡中>坡上的趋势, 但这一结果与冯洋等^[4]研究结论一致。研究区pH值分布相对均匀, 且值较高, 但受水土保持措施内植被因素的影响, 地埂植物带土壤pH值较低, 整个水土保持措施体系内水保林地土壤pH值最低。

2.3.2 研究区各个指标空间变化 从表5可看出, 在三个坡位范围内, 水保林地、水平梯田和地埂植物带的有机质、TN均高于无措施坡耕地, 表明水土保持措施具有拦蓄有机质、氮素的作用。同时, 不同坡位范围间相比, 从坡上到坡下, 水土保持措施对TN的拦蓄率逐渐减小, 分别为水保林地7.46%, 水平梯田6.30%, 地埂植物带5%;水保林地和地埂植物带对有机质的拦蓄率较高, 分别为水保林地15.72%, 水平梯田5.72%, 地埂植物带15.82%。表明上坡位的水保林地对TN的富集作用较好, 有利于上坡位TN在流失过程再利用, 另外, 在耕地上种植非农作物还可提高有机质含量。

由表5还可看出, 水保林地、水平梯田和地埂植物带的TP与有效P含量均明显高于无措施坡耕地。TP的拦蓄率分别为水保林地13.33%, 水平梯田9.52%, 地埂植物带10%;而有效P的拦蓄率分别为水保林地8.97%, 水平梯田26.52%, 地埂植物带13.04%。表明水保林地对TP的拦蓄最好, 而水平梯田对有效P的拦蓄作用显著。

由于水土保持林和地埂植物带常年对土壤的改善, 水保林地和地埂植物带土壤pH均低于无措施坡耕地, 由表5可看出, pH值的空间对比度分别为上坡位-7.08%, 中坡位-0.72%, 下坡位-2.38%, 表明水土保持措施体系内非农作物使土壤pH有所下降。

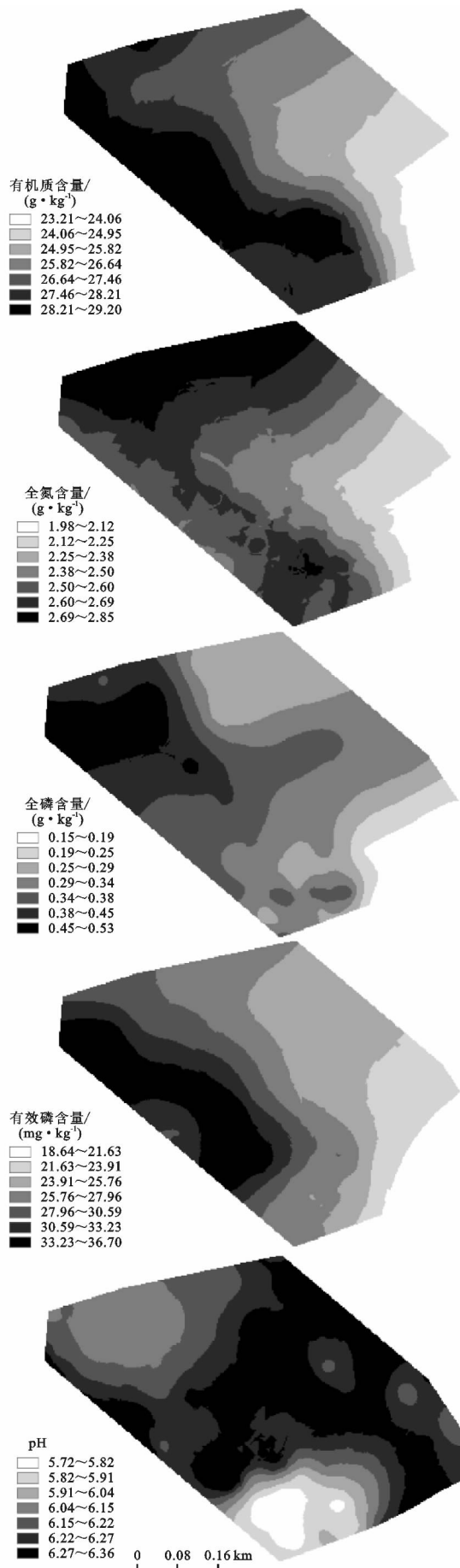


图1 研究区域各指标空间分布

表 5 各指标空间变化

坡位	措施	有机质		全氮		全磷		有效磷		pH	
		含量/ (g·kg ⁻¹)	对比度/ %	含量/ (g·kg ⁻¹)	对比度/ %	含量/ (g·kg ⁻¹)	对比度/ %	含量/ (g·kg ⁻¹)	对比度/ %	值	对比度/ %
上坡位	水保林地	20.46	15.72	2.10	7.46	0.26	13.33	17.91	8.97	5.82	-7.08
	无措施	13.36		1.34		0.15		11.59		6.26	
中坡位	水平梯田	20.11	5.72	1.99	6.30	0.33	9.52	24.07	26.52	6.24	-0.72
	无措施	14.50		1.59		0.21		14.52		6.29	
下坡位	地埂植物带	19.53	15.82	2.21	5.00	0.39	10.00	19.71	13.04	6.12	-2.38
	无措施	15.75		2.08		0.20		15.87		6.27	

3 结 论

(1) 采取水土保持措施对土壤养分有一定的富集作用,水保林地、地埂植物带和水平梯田的 TN,TP,有机质和有效 P 含量显著高于无措施对照区。土壤 TN,TP,有机质,有效 P 和 pH 值均与水保措施呈极显著相关;有机质和 TN,有效 P 和 TP 均呈现极显著正相关,有机质和 TN 的相关系数达到 0.822。5 个指标的空间变异度表现 TP>有效 P>TN>有机质>pH,TN,TP,有效 P,pH 的空间变异基本是非人为因素导致的,而有机质不仅受到非人为因素影响,也受人为因素影响。

(2) 运用 Kriging 插值制图显示,5 个指标在空间上均分布不均匀。本研究表明,处在不同坡位的不同水土保持措施对不同土壤养分含量影响不同;无措施坡耕地土壤养分坡上、坡中和坡下部位呈明显规律性变化。其研究区 pH 值分布相对均匀,其水保林地土壤 pH 值最低。

(3) 不同坡位范围间相比,上坡位的水保林地对 TN,TP 和有机质的拦蓄作用最好,中坡位的水平梯田对有效 P 的拦蓄作用显著;由于下坡位的无措施对照区作为土壤养分流失的必经区域,土壤养分含量较高,表现出地埂植物带对养分的拦蓄作用不显著。

参考文献:

[1] 张兴昌,邵明安. 植被覆盖度对流域有机质和氮素径流流失的影响[J]. 草地学报,2000,8(3):198-203.

[2] 张兴昌,邵明安,黄占斌,等. 不同植被对土壤侵蚀和氮素径流流失的影响[J]. 生态学报,2000,20(6):1038-1044.

[3] 刘佳,范吴明,周丽丽. 春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J]. 水土保持学报,2009,23(4):246-265.

[4] 冯洋,郭成久,李勇,等. 不同水土保持措施对黑土区坡耕地氮、磷流失的影响[J]. 水土保持研究,2014,21(3):47-56.

[5] 雷能忠,吴大鹏,王心源,等. 基于 ArcGIS 的土壤有机碳密度及储量计算[J]. 合肥工业大学学报,2008,31(11):1740-1743.

[6] 宋月君,吴胜军,刘永美,等. 基于 GIS 技术的农用地非点源磷污染危险性评价:以长江流域为例[J]. 测绘科学,2008,33(S1):137-140.

[7] 方广玲,香宝,赵玮,等. 基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报,2015,29(3):6-12.

[8] 成杰民,宋涛,李彦. 基于 GIS 的南四湖沿岸农业面源氮磷负荷估算研究[J]. 水土保持研究,2012,19(3):284-288.

[9] 倪九派,魏朝富,谢德体. 基于 GIS 的小流域养分流失预测[J]. 土壤学报,2004,41(6):837-845.

[10] 周丽丽,范吴明,贾燕锋,等. 磷素迁移规律与模拟[M]. 北京:中国农业出版社,2013.

[11] 贺小容,何丙辉,秦伟,等. 扰动地表及不同坡位土壤养分特征分析[J]. 水土保持研究,2014,21(2):17-26.

[12] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China[J]. Geoderma, 2013,197:67-78.

[13] Wang J, Wang D, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. Agricultural Water Management, 2014,141:66-73.

[14] Wang Y, Zhang X, Huang C. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma,2009,150(1):141-149.

[15] Chhabra A, Manjunath K R, Panigrahy S. Non-point source pollution in Indian agriculture: Estimation of nitrogen losses from rice crop using remote sensing and GIS [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010,12(3):190-200.

[16] 田冬,高明,徐畅. 土壤水分和氮添加对 3 种质地紫色土氮矿化及土壤 pH 的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):255-261.