

文章编号: 1006-4710(2013)03-0307-07

基于田块尺度的丹江上游坡改梯土壤养分空间变异性研究

黄萍萍¹, 李占斌^{1,2}, 徐国策², 张铁钢¹, 刘晓君²

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过对丹江上游流域的梯田和坡耕地样地进行网格法分层(0~10和10~20cm)取样, 采用经典统计学与地统计学相结合的方法, 研究了田块尺度上坡改梯土壤养分的空间变异性特征。结果表明, 梯田土壤的养分含量变异系数整体小于坡耕地; 全氮、全磷在梯田土壤中均具有强烈的空间相关性, 空间变异程度微弱, 且主要受结构因素影响。土壤有机碳空间相关性在梯田和坡耕地中均较强, 更多受到成土过程影响。Kriging插值绘制的养分含量空间分布图显示出, 梯田全氮、有机碳养分受梯田坎梗影响而呈阶梯状分布。梯田全磷养分分布较为连续, 显示出相对较好的空间同质性特征。坡耕地田块的养分分布多呈层状和块状分布, 养分含量不连续、不稳定, 表现出一定的空间异质性特征。

关键词: 田块尺度; 坡改梯; 地统计学; 土壤养分; 空间变异性

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

Research on Spatial Heterogeneity of Soil Nutrient on Slope Cropland and Terraced Field Scales in the Upper Reaches of the Danjiang River

HUANG Pingping¹, LI Zhanbin^{1,2}, XU Guoce², ZHANG Tiegang¹, LIU Xiaojun²

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University Technology, Xi'an 710048,

China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: The stratification sampling is conducted using the grid sampling method on the sample plots of terraced field and slope cropland (in soil layers at depths of 0~10 cm and 10~20 cm respectively) in the upstream watershed of the Danjiang River. The classical statistics and geo-statistics in combination are used to study the spatial variability characteristic of soil nutrients in the terraced field converted from slope cropland on field plot scale. The research results indicated that the variation coefficients of soil nutrients in terraced field as a whole were smaller than those in slope cropland; total nitrogen and total phosphorus in soil of terraced field are of strong spatial correlation with weak spatial variability, and are mainly subjected to structural factors. The spatial correlation of soil organic carbon in terraced field and slope cropland is rather strong, being more subjected to the effect of soil genesis process. The nutrient content spatial distribution map plotted with Kriging interpolation showed that total nitrogen and organic carbon nutrients in terraced field were subjected to field ridges, exhibiting terraced distribution; in contrast, the total phosphorous nutrient in terraced field was more continuously distributed, showing better spatial homogeneity. The soil nutrient distribution in slope cropland plots mostly exhibited stratified and blocky distribution, so that the nutrient contents are discontinuous and unstable, showing a certain spatial heterogeneity characteristic.

Key words: field plot scale; slope-to-terrace conversion; geo-statistics; soil nutrient; spatial variability

收稿日期: 2013-04-21

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAD31B01); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JE008); 陕西高校省级重点实验室科研资助项目(12JS065)

作者简介: 黄萍萍, 女, 硕士生, 研究方向为非点源污染与水土保持。E-mail: hpp1987@foxmail.com。

李占斌, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zhli@ms.iswc.ac.cn。

坡面是流域的基本单元,坡耕地是坡面水土流失的主要源头。水土流失作为养分流失的主要载体,坡面水土流失不仅加剧了区域土壤质量退化及生产力的下降^[1],且是造成河流非点源污染的主要原因。研究证实,梯田具有良好的水土保持性能,所以水平梯田的建设,可以有效遏制坡耕地水土流失造成的河流污染,保护河流水质洁净^[2]。长期以来,研究人员针对坡改梯之后的坡面减水减沙效益进行了系统研究^[3-5],对坡改梯之后土壤养分含量变化和空间分布研究相对缺乏。在地理现象的空间变异研究中,地统计学方法中的半方差模型及 Kriging 插值法充分考虑空间变异过程中的结构性及随机性,相比经典统计学而言更为精确^[6],且将空间格局与生态过程联系起来,能够解释空间格局对生态过程与功能的影响^[7]。不同研究尺度下土壤养分的空间分布规律明显不同,小尺度下能观测到大、中尺度不能观测到的土壤养分的细微变化^[8-13]。

本研究从小尺度下的坡面田块角度出发,利用经典统计学与地统计学相结合的方法,通过分析梯田和坡耕地的养分含量和空间分布的差异,以阐明坡改梯对土壤养分含量和空间分布的影响,为揭示梯田在非点源污染中的源汇效应提供科学依据,对丰富研究区坡地生态治理措施的理论基础及防治非点源污染具有重要意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

梯田和坡耕地样地分别选取在丹江上游地区的闵家河流域(水土保持工程治理流域)和引寺沟流域(未治理流域)。

(1)梯田采样流域:闵家河小流域属于商州区西部的黑龙口镇,该流域属丹江二级支流,是丹江口水库上游重要水源涵养区。地势西高东低,介于东径 109°40′~109°44′,北纬 33°44′~33°49′,流域总面积为 28.19 km²。小流域多年平均气温为 10.3℃,年平均最高气温为 18.7℃,年平均最低气温为 8.3℃,极端最高气温为 36.5℃,极端最低气温为 -14.8℃,大于 10℃积温为 3810.5℃,无霜期 194 天。多年平均降水量为 890.4 mm,降雨日 120 天,降雨年季变化受季风气候的影响,降水量具有明显的季节性,且多集中于 7~9 月。

(2)坡耕地采样流域:引寺沟小流域位于商州区西北方向腰市镇的腰市河中下游。腰市河是丹江一级支流板桥河的一级支流。土地总面积 56.44 km²,流域地势西北高东南低。多年平均气温为

12.9℃,年均最高气温为 18.7℃,年均最低气温为 8.3℃,极端最高气温为 39.8℃,极端最低气温为 -14.8℃,大于 10℃积温 4 018.8℃,无霜期 209 天。多年平均降雨量为 715.3 mm;降雨有明显季节性,7~9 月降雨最多,多年平均为 321 mm,最大年降雨量为 1125 mm,最小年降雨量为 472 mm。

1.2 样地特征及土样采集

梯田样地修建时间为 2008 年(丹治一期),样地共 6 个台阶,台阶田面宽度为 5.8~10.5 m,田面长度为 63.8~88.0 m,田坎高度为 0.8~2 m;坡耕地样地面积为 732 m²,坡度为 12~15°。梯田和坡耕地采样地的种植作物均为玉米,4 月末开始种植,施磷酸氢二铵(100 斤/亩)做底肥,5~7 月期间每月各施一次尿素(三次共计 100 斤/亩)进行追肥。

取样时间为 2012 年 8 月 27 日,采用网格法利用土钻分层(0~10 cm 和 10~20 cm)取样,采样点示意图和采样点间隔距离见图 1、2。梯田和坡耕地共计采样点 99 个。采样的同时进行 GPS 定位,记录各个样点的植被类型、坡度和坡向等样点信息。

●1	●2	●3	●4
●5	●6	●7	●8
●9	●10	●11	●12
●13	●14	●15	●16
●17	●18	●19	●20
●21	●22	●23	●24
●25	●26	●27	●28
●29	●30	●31	●32
●33	●34	●35	●36
●37	●38	●39	●40
●41	●42	●43	●44
●45	●46	●47	●48
●49	●50	●51	●52
●53	●54	●55	●56
●57	●58	●59	●60
●61	●62	●63	●64
●65	●66	●67	●68
●69	●70	●71	●72

图 1 梯田样地网格法采样点示意图

Fig. 1 Schematic of the grid sampling points on terraces

1.3 土壤样品测定

将野外采回的土样风干后分别研磨,经过土壤筛(全量元素分析样品为 0.25 mm,速效养分为 1 mm)后装入纸袋中备用。各养分测定方法如下:(1)称取 1.0 g 土样至凯氏瓶,加入催化剂和浓硫酸,消煮 1 h,然后用 Foss8400 全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮含量^[16];(2)称取 1.0 g 土样于玻璃消解管内,加入双氧水和浓硫酸,高温消煮至灰白色,放冷定容并稀释后,全磷含量用间断化学分析仪(ADA, CleverChem200,德国)测定;(3)称取 0.1 g 土样于取样舟内,滴入 0.1 mol/L 的盐酸,充分润湿样品,放入烘箱中,以 105℃烘 4 小时,取出静置过

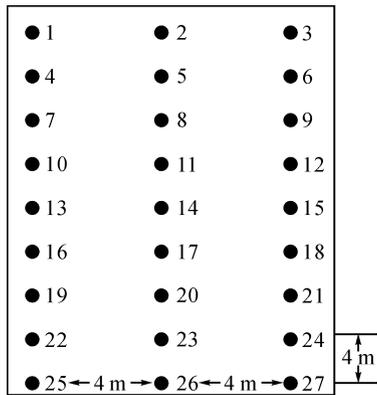


图2 坡耕地地网格法采样点示意图
Fig. 2 Schematic of the grid sampling points on the slope cropland

夜(12小时)后,采用TOC分析仪(HT 1300 Analyzer)测定土壤有机碳^[17]。

1.4 数据处理方法

实验数据统计分析用SPSS16.0软件。土壤养分的空间结构分析、Kriging插值均用ArcGIS9.2和GS+7.0软件进行分析。

1.5 半方差函数的理论模型

半方差函数的理论模型可用来分析土壤养分空间变异的随机性和结构性,它是地统计学特有工具和分析基础。半方差函数是研究空间变异的关键函数,该函数表达式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数; $[z(x_i); z(x_i + h)]$ 是间隔为 h 的2个观测点的实测值; $N(h)$ 为以 h 为步长的所有观测点的成对数目。由 $\gamma(h)$ 对 h 作图可得到半方差函数图,依据决定系数 R^2 和残差RSS对半方差函数进行拟合得到合理的理论模型。

2 结果与分析

2.1 土壤养分的含量分析

梯田和坡耕地在各土层深度下经典统计学特征的具体差异见表1。梯田和坡耕地养分含量均随土层深度的增加而降低,其变化范围也随之减小。梯田土壤全氮、全磷和有机碳在0~10m的均值分别为1.94 g/kg、0.92 g/kg和1.61 g/kg,坡耕地土壤全氮、全磷和有机碳在0~10cm的均值分别为1.02 g/kg、0.61 g/kg和0.75 g/kg。变异系数(CV)的大小可以反映土壤环境条件对养分迁移的影响程度。根据Nielsen和Bouma(1985)的分类系统:弱变异 $CV \leq 10\%$,中等变异 $10\% < CV < 100\%$,强变异 $CV \geq 100\%$ ^[14-15]。在土层深度0~10cm和10~20cm

下,土壤全氮、全磷和有机碳的变异系数均为中等变异,但坡耕地的变异系数较大,表明坡耕地土壤养分不均匀性更大,主要原因是随着水土流失的发生,养分也会随之迁移,造成了养分在坡面上存在一定的分布差异。梯田的变异系数整体小于坡耕地,这是由于梯田属于水土保持措施,水土流失量小,因而对养分迁移的影响较小。

2.2 土壤养分的空间结构分析

在GS+7.0软件中对两个土层深度下的梯田和坡耕地的土壤属性进行半方差函数模拟得到各自的理论模型及其拟合参数值,并将各地统计学参数归纳于表2。选取拟合度(R^2)最高且残差平方和(RSS)最小的模型作为最优模型^[14]。全氮的最优模型在梯田10~20cm深度下为高斯模型,在梯田表层和坡耕地两个深度下均为球状模型;全磷的最优模型在梯田0~10cm深度下为高斯模型,10~20cm深度下为球状模型,在坡耕地两个深度下均为线性模型;有机碳的最优模型在梯田和坡耕地的表层均为高斯模型,10~20cm深度下均为球状模型。

梯田的各养分块金系数在0.06%~16.54%波动,说明各养分在梯田土壤中均具有较强的空间相关性,且主要受结构因素影响。而坡耕地的块金系数变化差异较大,其全磷和全氮块金系数均高于梯田,特别是全磷元素块金系数在10~20cm土层下达到了78.37%,空间相关性极弱,随机因子加剧了养分在坡耕地土壤中的空间变异程度。另外,梯田养分的变程在14~18m,而坡耕地的变程在9~13m,说明梯田养分空间相关性较坡耕地大。

土壤有机碳空间变异性在梯田和坡耕地中均较弱,块金系数仅为3.42%~12.55%,空间相关性较强,说明结构性因子是影响土壤有机碳含量分布特征的主要因素。近几年来农民在种植过程中施用氮磷等复合化肥,越来越忽视对土壤中有机物质的供给,致使土壤中有机碳的含量更多的受到土壤类型和成土母质的影响,而受施肥等随机因素的影响较小^[10]。因此,梯田和坡耕地的有机碳空间结构性差异不大。

可以看出在田块尺度上,各养分元素间具有相近的结构性因子^[11],坡耕地较大的块金值表明较小尺度上的水土流失过程不可忽视;而梯田发挥其水土保持作用,能够有效的减缓养分的迁移过程,使得土壤养分具有强烈的空间相关性而在土体中均匀分布。梯田的块金方差低于坡耕地,但多数养分仍大于0,因此梯田土壤养分空间结构分布中由随机因素引起的微弱变异也值得关注。

表1 不同深度下土壤养分的统计特征值

Tab.1 Statistical characteristic value of the soil nutrients under different depth

梯田								
养分	土层厚度/cm	样品量	极小值/(g/kg)	极大值/(g/kg)	均值/(g/kg)	标准差/(g/kg)	CV/%	K-S(P)
全氮	0~10	72	1.16	2.61	1.94	0.31	15.85	0.530
	10~20	72	0.86	2.5	1.78	0.33	18.77	0.584
全磷	0~10	72	0.55	1.34	0.92	0.13	13.91	0.766
	10~20	72	0.55	1.4	0.83	0.14	16.73	0.975
有机碳	0~10	72	0.91	2.13	1.61	0.28	17.54	0.789
	10~20	72	0.58	2.18	1.5	0.31	20.88	0.464
坡耕地								
养分	土层厚度/cm	样品量	极小值/(g/kg)	极大值/(g/kg)	均值/(g/kg)	标准差/(g/kg)	CV/%	K-S(P)
全氮	0~10	27	0.76	2.3	1.02	0.28	27.22	0.017
	10~20	27	0.48	1.44	0.7	0.2	28.83	0.317
全磷	0~10	27	0.18	0.99	0.61	0.16	25.64	0.908
	10~20	27	0.22	0.72	0.51	0.11	21.66	0.224
有机碳	0~10	27	0.58	0.92	0.75	0.09	11.33	0.88
	10~20	27	0.35	0.72	0.52	0.1	19.76	0.779

表2 不同深度下土壤属性的空间结构特征

Tab.2 Spatial structure characteristics of soil properties under different depth

梯田								
养分	土层厚度/cm	块金值	基台值	块金系数/%	变程	模型	R ²	RSS
全氮	0~10	0.00	0.10	1.45	16.14	球状	0.76	2.65E-03
	10~20	0.01	0.11	10.14	15.42	高斯	0.77	2.04E-03
全磷	0~10	0.00	0.02	0.06	14.12	高斯	0.51	1.35E-04
	10~20	0.01	0.02	16.54	18.17	球状	0.39	4.61E-04
有机碳	0~10	0.01	0.08	10.46	15.75	高斯	0.58	3.31E-03
	10~20	0.01	0.10	4.68	16.36	球状	0.68	2.03E-03
坡耕地								
养分	土层厚度/cm	块金值	基台值	块金系数/%	变程	模型	R ²	RSS
全氮	0~10	0.02	0.06	29.10	11.02	球状	1.00	2.61E-07
	10~20	0.01	0.05	17.05	12.38	球状	1.00	1.79E-08
全磷	0~10	0.02	0.03	63.73	12.85	线性	0.45	2.08E-05
	10~20	0.01	0.01	78.37	12.85	线性	0.68	3.10E-07
有机碳	0~10	0.00	0.01	3.42	9.27	高斯	1.00	2.63E-08
	10~20	0.00	0.01	12.55	11.89	球状	1.00	1.80E-09

2.3 土壤养分空间插值分析

对在土层深度 0~10 cm 和 10~20 cm 下的土壤全氮、全磷、有机碳进行 Kriging 差值分析见图 3~4。梯田和坡耕地东北方向为坡面上部,西南方向为坡面下部。结果表明,梯田全氮养分受梯田坎埂影响而呈阶梯状分布,由东北到西南方向养分含量逐渐增大,说明梯田土壤全氮随梯坎的降低呈增大趋势。梯田全磷养分分布较为连续,在表层超过 2/3 的面积土壤全磷含量处在这层全磷含量的平均值水平,而下层土壤同样有 1/2 的面积的全磷含量能够达到该层全磷平均值,表现出相对较好的空间同质性特征。因不少研究指出,土壤中有有机氮与全氮具有很好的相关性,且全氮中 90% 以上为有机氮^[18],所以梯田有机碳分布格局与全氮较为相似,但有机碳分布格局中变化级差比全氮小,这是因为土壤中有有机碳分布与有机质关系密切,有机质较不

易发生迁移且影响因素较多。

坡耕地全氮和有机碳含量在 0~10 cm 总体上呈现向坡下部汇聚的趋势,这与土壤养分随降雨径流向坡耕地下部迁移有关;在 10~20 cm,土壤全氮和有机碳呈现和 0~10 cm 相似分布方式,但分层更加明显。土壤全磷在坡耕地 0~10 cm 上部含量较大,但也呈现出随坡面迁移的趋势,其在 10~20 cm 呈现出明显的从坡上部至坡下部的降低趋势,表现出与土壤全氮和有机碳分布的差异,这是因为土壤磷素以及施加的磷肥容易与土壤成土矿物、氧化物及土壤表面的固磷介质形成不易溶解的稳定化合物,该化合物常为沉淀态,或吸附于土壤颗粒物表面^[19],不易发生迁移。在 10~20 cm,壤中流有一定发育^[20],全磷中的速效磷流失较大,表现出较明显的分层现象。总之,土壤养分在整个坡耕地的分布多呈层状和块状分布,养分含量坡面分布差异较大。

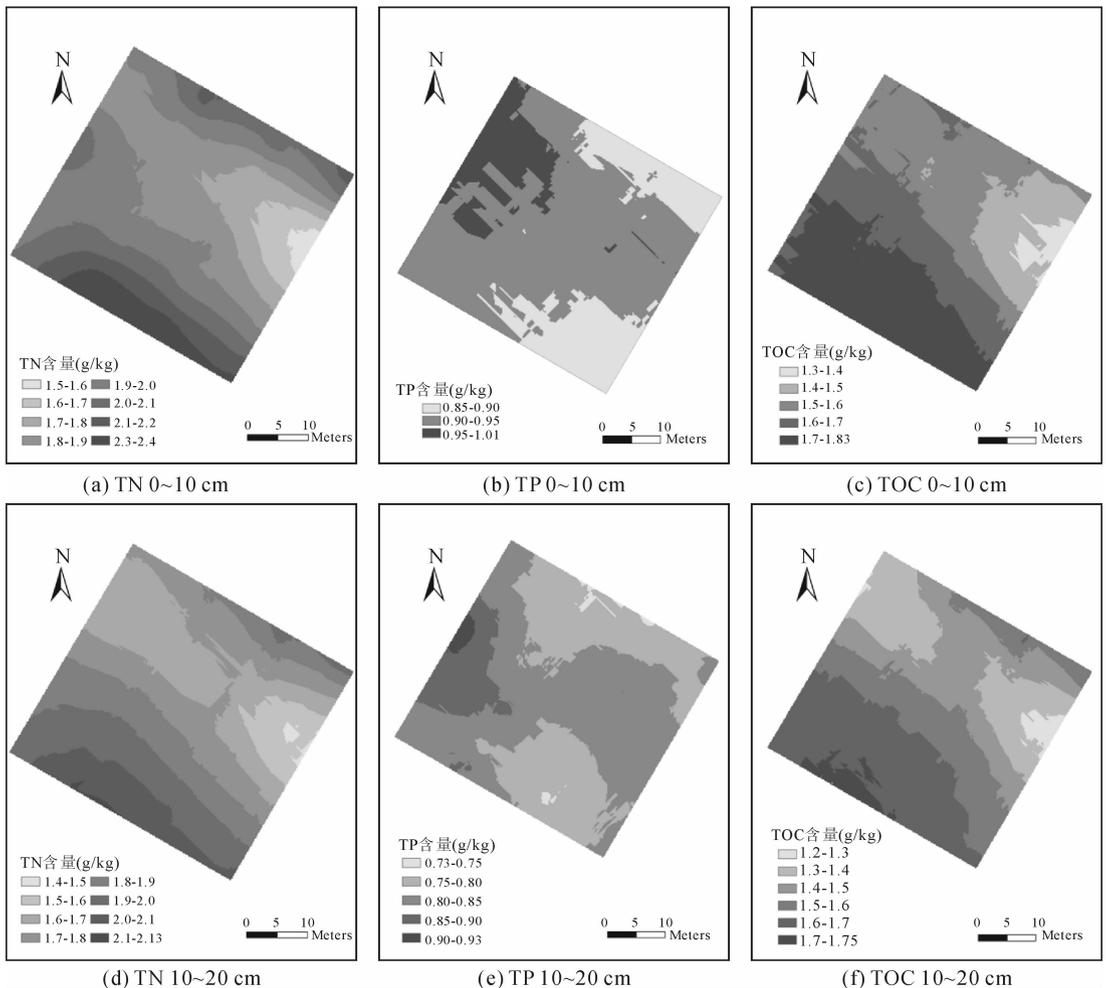


图3 梯田不同土层深度下养分含量的空间差值结果

Fig. 3 Spatial interpolation of nutrient content under different depth on the terraces

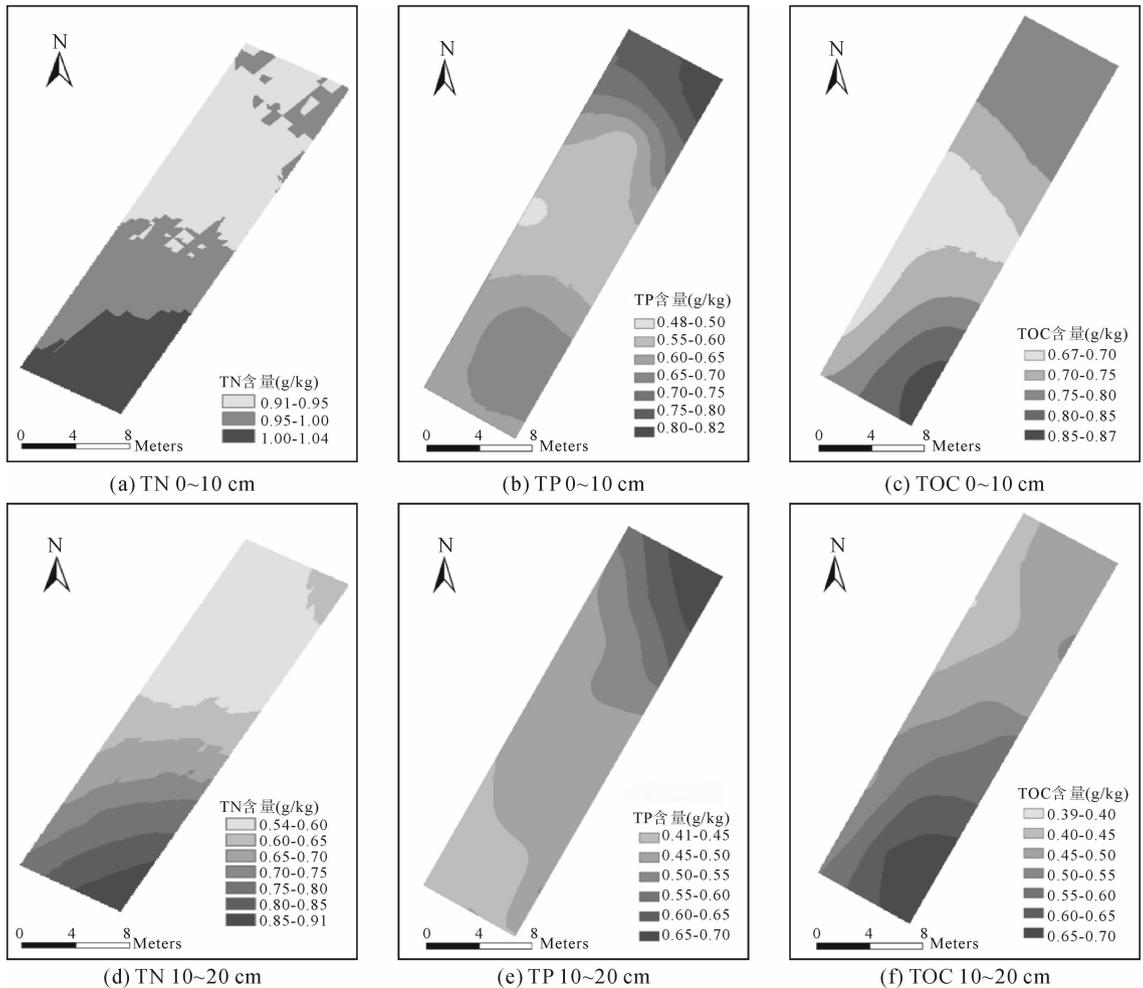


图4 坡耕地不同土层深度下养分含量的空间差值结果

Fig. 4 Spatial interpolation of nutrient content under different depth on the slope cropland

3 结论

1) 梯田有保持养分的能力, 梯田土壤(土层0~10和10~20cm)的养分含量变异系数整体小于坡耕地, 均匀性更高;

2) 全氮、全磷在梯田土壤中均具有强烈的空间相关性, 空间变异程度微弱, 且主要受结构因素影响; 土壤有机碳空间相关性在梯田和坡耕地中均较强, 更多受到成土过程影响; 坡耕地较大的块金值表明较小尺度上的水土流失过程不可忽视; 梯田发挥其水土保持作用, 能够有效的减缓养分的迁移过程, 使得土壤养分具有强烈的空间相关性, 在土体中均匀分布;

3) Kriging 插值绘制的养分含量空间分布图显示, 梯田全氮、有机碳养分受梯田坎埂影响而呈阶梯状分布。梯田全磷养分分布较为连续, 表现出相对较好的空间同质性特征; 坡耕地田块的养分分布多呈层状和块状分布, 土壤养分含量较为不连续、不稳

定, 表现出一定的空间异质性特征。

参考文献:

- [1] 尹娜. 小流域水土流失治理对土壤养分空间分布调控作用的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
Yin Na. Study on small watershed soil reosion governance monitoring to the spatial distribution of soil nutrients [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [2] 白丹, 王玮, 王勇. 南水北调中线水源区水平梯田建设效益分析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 2(1): 158-161.
Bai Dan, Wang Wei, Wang Yong. Level terrace construction-benefit analysis of water district of south-to-north water diversion project [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2010, 2(1): 158-161.
- [3] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J]. 水土保持学报, 1999, 5(3): 59-63.
Jiao Juying, Wang Wanzhong, Li Jing. Analysis on soil and water conservation benefit of level terrace under different

- rainfall condition in loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 5(3): 59-63.
- [4] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J]. *中国水土保持科学*. 2004, 2(01): 34-37.
Wu Faqi, Zhang Yubin, Wang Jian. Study on the benefits of level terrace on soil and water conservation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(01): 34-37.
- [5] 姚云峰, 王礼先. 水平梯田减蚀作用分析[J]. *中国水土保持*, 1992(12): 40-41.
Yao Yunfeng, Wang Lixian. Analysis of effects of bench terraced field on reducing soil erosion[J]. *Soil and Water Conservation In China*, 1992(12): 40-41.
- [6] 朱松丽. 土壤主要理化特性的空间变异性初步研究[D]. 北京: 北京师范大学, 1999.
Zhu Songli. A preliminary study on the main physical and chemical properties of soil spatial variability[D]. Beijing: Beijing Normal University, 1999.
- [7] 赵军, 张久明, 孟凯, 等. 地统计学及 GIS 在黑土区域土壤养分空间异质性分析中的应用—以海伦市为例[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(6): 53-57.
Zhao Jun, Zhang Jiuming, Meng Kai, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in black soil—a case study at Hailun County[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(6): 53-57.
- [8] 王淑英, 路苹, 王建立等. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征—以北京市平谷区为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4957-4964.
Wang Shuying, Lu Ping, Wang Jianli, et al. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: a case study in Pinggu County, Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4957-4964.
- [9] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1673-1676.
Jiang Yong, Zhang Yuge, Liang Wenju, Spatial variability of soil nutrients in cultivated surface soil of Sujiatun District, Shenyang City[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1673-1676.
- [11] 姜勇, 梁文举, 张玉革. 田块尺度下土壤磷素的空间变异性[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2086-2091.
Jiang Yong, Liang Wenju, Zhang Yuge. Spatial variability of soil phosphorus in field scale[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2086-2091.
- [12] 高美荣, 朱波, 黄菊英, 等. 紫色土坡地尺度土壤养分的空间变异特性[J]. *西南农业学报*, 2007, 10(6): 1241-1245.
Gao Meirong, Zhu Bo, Huang Juying, et al. Characteristics of spatial variability of nutrients in slope land of purple soil at plot-scale[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 10(6): 1241-1245.
- [13] Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau[J]. *China. Geoderma*, 2009, 150(1/2): 141-149.
- [14] 徐国策, 李占斌, 李鹏, 等. 丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1547-1555.
Xu Guoce, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Spatial distribution of soil total nitrogen in a typical watershed of the middle Danjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1547-1555.
- [15] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[M]. PUDOC, Wageningen, 1985.
- [16] Xu Guoce, Li Zhanbin, Li Peng. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China[J]. *Catena*, 2013(101), 17-23.
- [17] Xu Guoce, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed of the Dan River, China[J]. *Soil Research*, 2013, (51): 41-49.
- [18] 徐国策, 李占斌, 李鹏, 等. 丹江鸚鵡沟小流域土壤总氮空间变异特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 59-63.
Xu Guoce, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Study on TN spatial variability of Yingwugou Small Watershed in Dan River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 59-63.
- [19] Haygarth P M, Jarvis S C. Soil derived phosphorus in surface runoff from grazed grassland lysimeters[J]. *Water Research*, 1999, 13: 140-148.
- [20] 彭圆圆, 李占斌, 李鹏. 模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流氮素流失特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(02): 1-5.
Peng Yuanyuan, Li Zhanbin, Li Peng. Slope of nitrogen loss in the rocky mountain area of Parrot Ditch under the condition of rainfall simulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(02): 1-5.

(责任编辑 杨小丽)