

丹江鹦鹁沟小流域坡耕地土壤属性剖面分布研究

徐国策¹, 李占斌^{1,2}, 王利军³, 张铁钢², 黄萍萍²

(1. 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; 2. 西安理工大学, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048; 3. 内蒙古达拉特旗水土保持工作站, 内蒙古 达拉特旗 014300)

摘 要:在丹江鹦鹁沟小流域,利用土钻对坡耕玉米地不同深度的水分含量和养分含量进行了采样测定,应用传统统计学和地统计学的方法,对不同深度土壤属性进行了分析。结果表明:总氮和土壤有机碳的均值总体上表现为随土层深度的增加而降低;土壤水分含量则随土层深度的增加而增加;总磷随土层深度的变化不明显。总氮、土壤水分含量、土壤有机碳和总磷呈中等强度变异和强空间依赖性。在 4 个采样深度下,半方差模型对总氮、土壤水分含量和总磷在 0—10 cm 和 10—20 cm 的空间结构有很好的模拟精度;土壤有机碳的空间结构则较差,不能用半方差模型进行很好的模拟。经 Kriging 插值分析,总氮、土壤水分含量和总磷在 0—10 cm 和 10—20 cm 主要呈层状分布;从 0—10 cm 到 10—20 cm,总氮平均含量由 0.598 g/kg 减小为 0.310 g/kg,土壤水分含量和总磷的平均含量则分别从 12.988%, 0.229 g/kg 增大到 15.439%, 0.366 g/kg。

关键词:坡耕地;总氮;总磷;土壤有机碳;剖面分布

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)02-0009-06

Profile Distribution of Soil Properties on Sloping Cropland in Small Yingwugou Watershed of the Dan River Basin

XU Guo-ce¹, LI Zhan-bin^{1,2}, WANG Li-jun³, ZHANG Tie-gang², HUANG Ping-ping²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Soil and Water Conservation Station of Dalad Banner, Dalad, Inner Mongolia 014300, China)

Abstract: The contents of soil water and soil nutrients on sloping corn land in Yingwugou watershed were determined for each soil sample of four different soil depths. Both traditional and geostatistics methods were applied to analyze soil properties in the four different soil depths. The results indicated that the mean contents of soil total nitrogen and soil organic carbon generally decreased with the increase of depth. The mean soil water content rose with the increase of depth. The soil total phosphorus did not indicate obvious change with the increase of soil depth. The total nitrogen, soil water content, soil organic carbon and total phosphorus had moderate variability and strong spatial dependence. The spatial structures of total nitrogen, soil water content and total phosphorus in 0—10 cm layer and 10—20 cm layer could be modeled with a high degree of confidence by semi-variograms in the four different soil depths. The soil organic carbon could not be modeled with a high degree of confidence for the poor spatial structure. The Kriging interpolation in 0—10 cm layer and 10—20 cm layer showed that total nitrogen, soil water content and total phosphorus were hierarchical distribution along the soil depth, the mean contents of total nitrogen decreased from 0.598 g/kg to 0.310 g/kg, and the mean contents of soil water and total phosphorus increased from 12.988%, 0.229 g/kg to 15.439%, 0.366 g/kg, respectively.

Key words: sloping cropland; total nitrogen; total phosphorus; soil organic carbon; profile distribution

收稿日期:2012-08-09

修回日期:2012-09-12

资助项目:国家自然科学基金“植被格局对坡沟水蚀过程调控机理研究项目”(41071182);陕西省自然科学基金“自然—人工植被对非点源污染过程调控机理试验”(2011JE008);陕西高校省级重点实验室科研项目“植被覆盖与格局变化对非点源污染过程调控机理试验研究”(12JS065)

作者简介:徐国策(1985—),男,河南洛阳人,在读博士,主要从事非点源污染及土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。E-mail: xuguoce_x@163.com

通信作者:李占斌(1962—),男,河南南阳人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: zhanbinli@126.com

土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)和总磷(TP)是评价土壤质量的重要指标,不但可以反映土壤肥力状况,而且可以反映土壤环境质量状况,用来评价土壤的生产、环境和健康功能。SOC是陆地碳库最大的组成部分,在陆地碳循环中起着关键性作用,也是全球碳循环研究的重要内容^[1]。土壤水分含量(SWC)和分布影响着一系列的水文学过程,例如溶质迁移、地下水补给、与大气的物质和能量交换等,还关系到径流的产生和土壤保持^[2-5]。

土壤养分具有一定的空间分布特点,并表现出一定的空间性和随机性,是气候、地形和人类活动等因素综合作用的结果,对土壤养分空间变异的充分了解是土壤养分管理和合理施肥的基础,研究一个区域内,同一时间,同一地点,不同土层土壤养分的剖面分布是十分必要的,是调整各项管理措施和各项物质投入量、获得最大经济效益的基础。长期施肥不仅影响着土壤中养分数量的变化,而且由于养分的下移也影响土壤中养分的剖面分布。这种剖面分布在生产上有两个方面的意义:一是养分下移超过根系所能吸收的范围,将造成养分的淋失,进而影响水体质量;二是养分适度下移,可以丰富底土养分数量,这对于培育土壤肥力异常有利^[6-8]。

本文采用地统计学方法,选取陕南丹江鹦鹉沟小流域一块玉米地,运用网格法研究了0—60 cm土层深度下,土壤属性的剖面分布特征,旨在揭示小流域坡耕地不同土壤深度下养分和水分的空间分布状况,从而为南水北调小流域非点源污染治理和农田管理提供指导。

1 研究区概况

鹦鹉沟小流域位于陕西省商洛市商南县城东南约2 km处的城关镇五里铺村,介于东经110°52′16″—110°55′30″、北纬33°29′55″—33°33′50″。流域总面积1.86 km²,流域内主沟长3 232.90 m,最大主沟道比降0.01 m/m,流域坡面比降0.33 m/m,属于多边形水系。流域大部分为低山丘陵地貌,沟谷开阔,最高海拔600 m,最低海拔464 m。年平均降水量803.2 mm,其中7—9月份的降水量占全年降水量50%左右,且多以暴雨形式出现。流域内土壤以黄棕壤为主,质地多为沙壤,有机质、微量元素较缺乏。土地覆盖类型以农地、林地和草地为主。乔木以栎树、松树为主,灌木树种较多且杂,草地以禾本科的草为主,林草覆盖率在60%以上。农地以小麦、玉米和花生为主。

2 材料和方法

2.1 土壤样品采集

于2011年8月28日—9月1日在研究区坡耕玉米地(坡度为20°)利用土钻进行3 m×3 m网格状土样采集,采样点共计39个(图1)。采样深度60 cm,按0—10,10—20,20—40和40—60 cm 4个深度分层采集各土层的土壤样品,每层约1.0 kg,带回实验室分析。将风干后的土壤分别研磨,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。土层深度0—10,10—20,20—40和40—60 cm分别用A1,A2,A3,A4表示。

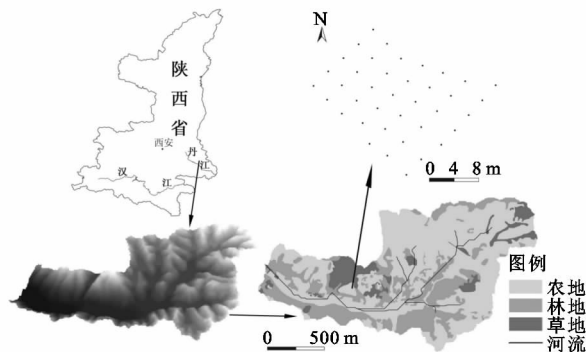


图1 研究区位置及采样点分布

2.2 土壤样品测定

(1) 土样风干过筛后,称取0.5~1.0 g土样至凯氏瓶,加硫酸和催化剂,消煮1 h,然后用Foss 8400全自动凯氏定氮仪测定土壤总氮含量。(2) 总磷用间断化学分析仪(ADA,CleverChem200,德国)测定。(3) 土壤总有机碳含量采用TOC分析仪(N/C 2100 Analyzer)法测定。(4) 土壤含水量采用铝盒烘干法测定,105℃下烘干8 h。

2.3 数据处理方法

(1) 样本的描述性分析采用Microsoft Excel 2003 and SPSS 16.0软件进行;(2) 空间分布图采用ArcGIS 9.2制作;(3) 地统计分析采用GS⁺(7.0)进行。

3 结果与分析

3.1 不同土层深度土壤属性的统计特征分析

鹦鹉沟小流域坡耕地4个采样深度下TN、SWC、SOC和TP的基本统计特征见表1。TN含量的均值表现为A1>A2>A3>A4,表明总氮含量随土层深度的增加而降低。SOC总体上也表现为随土层深度的增加而降低。SWC则相反,均值表现为A1<A2<A3<A4,说明SWC含量随土层深度的增加而增大,这是因为表层土壤水分表现活跃,变化剧烈,

随着降雨事件的发生其土壤水分含量会迅速增大,而随着土壤蒸发和植物吸水的持续发生会逐渐降低。相对表层,深层土壤水分含量相对稳定。而采样前仅在 8 月 21 日有 39.6 mm 的降雨,至采样时,多为阴天,从而使表层土壤水分含量也较大。土壤水分层状分布对水分的入渗和污染物的迁移有很大影响,加强对坡耕地水分的研究,对于认识一定深度上的土壤储水量有重要意义^[9-10]。

TP 随土层深度的变化不明显。变异系数是一个无量纲数值,表示单位量的变异,可用以相互比较,反映了土壤的异质性。从变异系数来看,TN、SWC、SOC 和 TP 的变异系数均在 0.10~1.00,属于中等变

异。其中 SWC 在 4 个采样深度的变异系数均较小,表明 SWC 的变异相对 TN、SOC 和 TP 要弱。在 A2 和 A3 层,SWC 与 TN 呈显著正相关($P<0.05$),在 A1 和 A2 层,SOC 与 TN 亦呈显著正相关($P<0.05$),TP 与其它 3 个土壤属性的关系不显著。由于 Kriging 方法对正态分布数据的预测精度最高,故在进行地统计分析之前,需要检验土壤属性数据集是否满足正态分布。从 K—S 正态检验可以看出,TN、SWC 和 SOC 基本服从正态分布,只有 TP 不服从正态分布。故对不服从正态分布的 TP 进行对数转化,转化后的 TP 数据呈正态分布($P>0.05$),可以满足下一步分析的要求。

表 1 不同土层深度土壤属性的统计特征

土壤属性	最小值	最大值	平均值	偏度	峰度	标准差	变异系数	K—S(P 值)
TN_A1	0.18	1.90	0.62	1.69	3.42	0.39	0.63	0.24
TN_A2	0.04	0.79	0.32	0.66	−0.66	0.20	0.64	0.37
TN_A3	0.01	0.60	0.27	0.17	−1.20	0.17	0.61	0.35
TN_A4	0.01	0.90	0.32	0.89	0.17	0.23	0.71	0.42
SOC_A1	1.96	9.32	5.56	0.22	−0.14	1.68	0.30	1.00
SOC_A2	1.56	11.93	5.48	0.50	−0.01	2.39	0.44	0.90
SOC_A3	1.47	11.93	5.54	0.87	0.89	2.39	0.43	0.31
SOC_A4	0.20	8.77	3.81	0.35	−1.01	2.66	0.70	0.54
SWC_A1	5.46	20.23	13.12	0.28	0.70	3.10	0.24	0.40
SWC_A2	10.19	22.84	15.64	0.18	−1.15	3.58	0.23	0.69
SWC_A3	9.60	23.02	17.59	−0.16	−0.84	3.48	0.20	0.57
SWC_A4	3.35	23.95	17.88	−1.35	2.34	4.22	0.24	0.08
TP_A1	0.09	0.48	0.22	0.62	−1.10	0.12	0.54	0.06
TP_A2	0.18	0.92	0.37	2.48	6.76	0.15	0.40	0.00
TP_A3	0.06	0.45	0.16	2.05	3.39	0.09	0.60	0.00
TP_A4	0.05	0.69	0.26	0.81	−0.23	0.17	0.64	0.02

注:K—S(P),Kolmogorov—Smirnov,正态检验达显著水平: $P\geq 0.05$ 。TN、SOC 和 TP 的最小值、最大值、平均值的单位均为 g/kg,SWC 的最小值、最大值、平均值的单位为 %。

3.2 不同土层深度土壤属性的空间结构分析

在 GS⁺ 7.0 中对 4 个深度下的土壤属性进行半方差函数模拟得到各自的半方差模型及其参数值,将 4 个土层的地统计参数归纳于表 2。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。TN、SWC 和 TP 在 4 个采样深度下,A1 和 A2 的决定系数较高,都在 0.90 以上,且残差平方和也均较小,说明模型的拟合精度很高,能很好地反映其在 A1 和 A2 上的空间结构特征。而 SOC 在 A1 和 A2 的决定系数较低,模型拟合精度较低。所以,本研究主要对 TN、SWC 和 TP 在 A1 和 A2 的空间变异进行进一步分析。变程反映区域化变量影响范围的大小,或者说反映该变量自相关范围的大小。4 个土壤属性的变程最小值为 3.19 m,大于本次网格采样的间距 3 m,说明本次网格状采样可以满足空间分析的要求。

在 A1 和 A2 层,TN、SWC 和 TP 主要为球状模型,TN 和 TP 由 A1 到 A2 变程变小,说明其空间自相关范围逐渐变小,但 SWC 则相反。这主要是因为 TN 和 TP 是由土壤表层向深层迁移并受到壤中流的影响,土层越深,迁移过程和壤中流作用越弱,SWC 则是土壤水分由上而下逐渐蒸发,受到下层水分的作用。

块金值表示随机部分的空间异质性,较大的块金值表明较小尺度上的某种过程不可忽视。基台值越大表示总的空间异质性程度越高。块金系数为块金值与基台值之比,如果该值比较高(如大于 0.5),说明随机部分引起的空间异质性程度较高,如果比值接近于 1,则说明景观中某一变量在整个尺度上具有恒定的变异^[2,11]。由表 2 可知,TN、SWC 和 TP 在 4 个土层深度下的块金值均较小,说明由随机部分引起的空间异质性较小。SOC 在 A1 和 A4 层的块金值相对较

大,说明随机部分的影响较大。TN 和 TP 的基台值相对较小,说明其总的空间异质性程度较低,每个土层内的数值差异相对较小。SOC 和 SWC 的基台值都较大,说明其总的空间异质性程度较高,每个土层内的数值差异相对较大。SOC(A1)和 TP(A3)的块

金系数为 1,说明其为随机分布,即变量不存在空间相关性;除此之外,TN、SOC、SWC 和 TP 的块金系数基本都小于 0.25,表明它们均为强空间依赖性,其变异主要来自结构因素(气候、地形和母质等),随机因素(耕作、施肥等)影响较小^[12-14]。

表 2 不同土层深度土壤属性的空间结构特征

土壤属性	块金值	基台值	变程/m	决定系数/ R^2	块金系数	模型	RSS
TN_A1	0.02	0.26	6.62	0.92	0.07	球状	1.93E-04
TN_A2	0.02	0.45	5.95	0.91	0.05	球状	3.45E-04
TN_A3	0.00	0.03	7.03	0.88	0.09	球状	5.50E-06
TN_A4	0.17	1.09	8.73	0.88	0.16	指数	3.25E-03
SOC_A1	2.86	2.86	9.87	0.00	1.00	线性	—
SOC_A2	0.16	4.54	8.07	0.76	0.04	指数	1.33E-01
SOC_A3	0.61	5.98	3.42	0.60	0.10	指数	1.42E-02
SOC_A4	4.38	12.86	25.06	0.97	0.34	高斯	1.05E-01
SWC_A1	0.28	7.87	5.30	1.00	0.04	球状	1.01E-04
SWC_A2	0.54	12.17	12.09	1.00	0.04	球状	1.67E-03
SWC_A3	0.44	11.8	5.39	0.29	0.04	球状	2.90E+00
SWC_A4	0.01	16.65	3.19	0.00	0.00	高斯	—
TP_A1	0.01	0.03	18.07	1.00	0.22	高斯	1.89E-07
TP_A2	0.00	0.02	16.20	1.00	0.01	球状	1.57E-08
TP_A3	0.01	0.01	9.88	0.00	1.00	线性	—
TP_A4	0.00	0.03	10.26	0.98	0.04	指数	8.64E-07

为了比较采样深度对 TN、TP 和 SWC 地统计结果的影响,利用 GS⁺ 软件对其进行半方差函数理论模型模拟计算,结果见图 2。由图 2 可见,半方差模型对 A1 和 A2 有较好的模拟精度。除去 TP 在 A2 的最优模型是高斯模型外,其余三者在 A1 和 A2 的最

优模型均为球状模型。土壤属性变异的空間异质性也一直备受关注,它影响到采样方法和 Kriging 插值的结果等。因此,本文也分析了土壤属性半方差函数的各向异性。结果表明,TN、TP 和 SWC 在 A1 和 A2 呈各向异性。

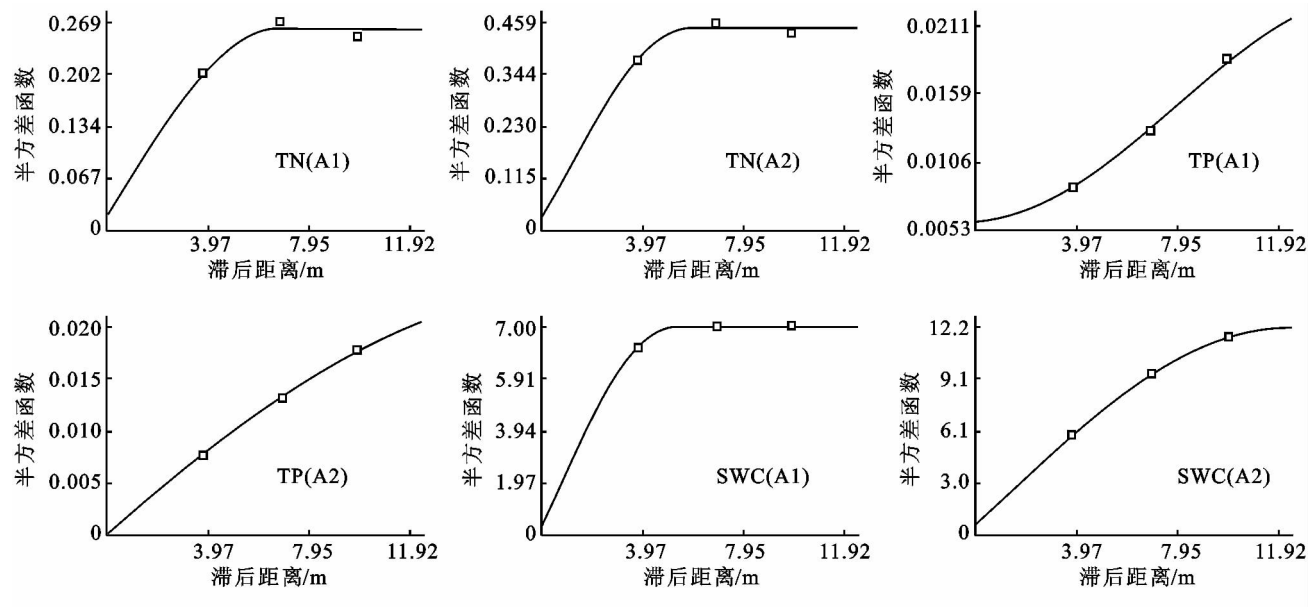


图 2 TN、TP 和 SWC 在 A1 和 A2 的半方差函数理论模型

3.3 空间插值分析

对 A1 和 A2 的 TN、TP 和 SWC 值进行 Kriging 插值,绘制了坡耕地两个土层深度下 TN、TP 和 SWC

的空间分布图(图 3),以便更直观地反映土壤特性的空间分布情况。由图 3 可见,TN 在 A1 的变化范围比 A2 大,TN 在 A1 呈层状分布,由西北到东南呈增大趋

势。SWC 和 TP 在 A1 的变化范围比 A2 小,SWC 在 A2 层的分布与 A1 相似,都是在坡耕地下部土壤含水量较高。TP 在 A1 层的分布呈中间大,上下两端小,在 A2 层呈现较明显的斑块状分布。另外,从 A1 到 A2, TN 平均含量由 0.598 g/kg 减小为 0.310 g/kg,SWC 和 TP 的平均含量则分别从 12.988%,0.229 g/kg 增大到 15.439%,0.366 g/kg。

Kriging 插值结果还表明,在小尺度上,该插值方法依旧抹去了一部分 TN、TP 和 SWC 含量较大和较

小的区域,整体上有明显的平滑效应,使其斑点状分布基本消失,在含量很高的区域尤为明显。但总体来说,Kriging 插值能很好地表现 TN、TP 和 SWC 空间分布的趋势。Kriging 插值结果和实测值有一定差异,主要是因为 Kriging 插值理论属于线性回归理论,它是对描述某一属性空间分布的随机函数的条件数学期望的估计,具有明显的平滑效应,适合于对变化不大的空间属性进行插值和分布特征呈现,对于数据的突变缺乏很好的表现能力^[2,15]。

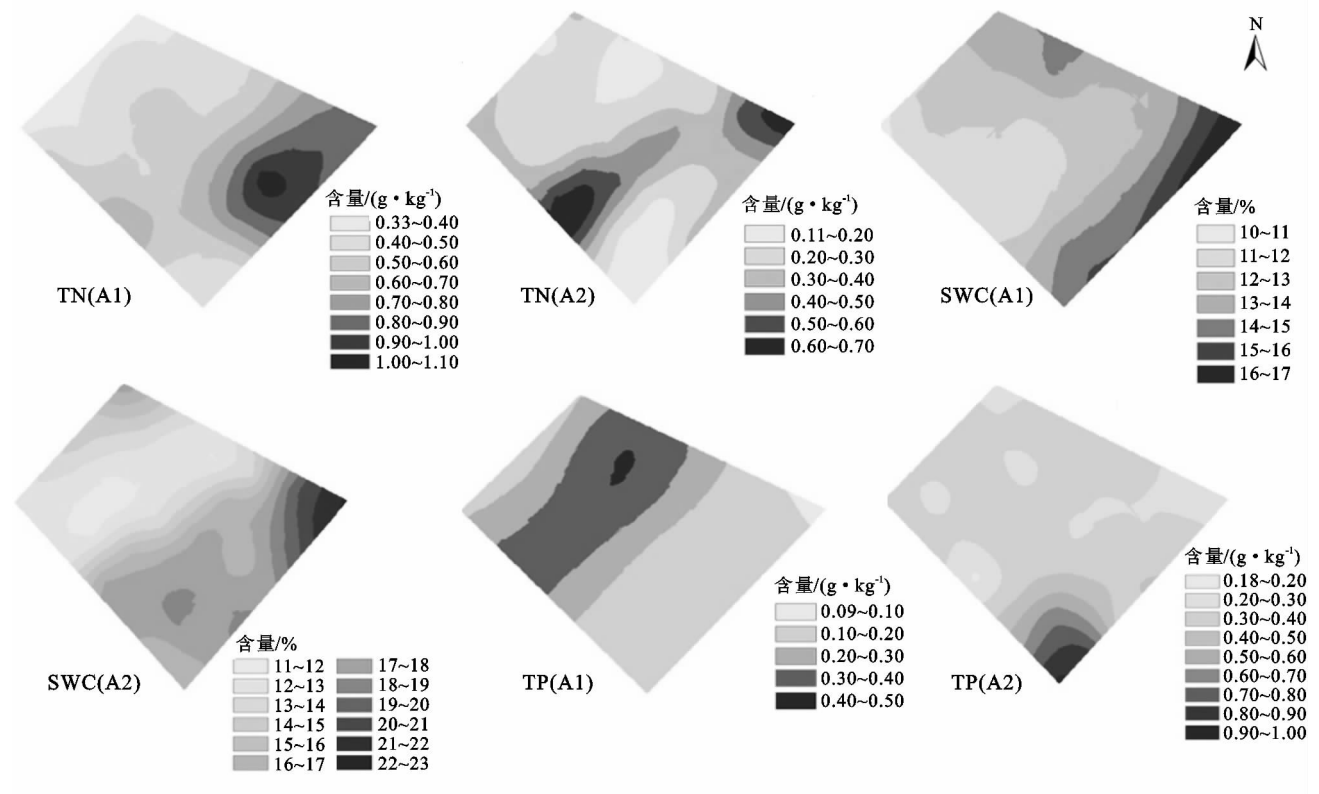


图 3 TN、TP 和 SWC 在 A1 和 A2 的空间插值结果

3.4 空间自相关分析

研究空间上一个变量与其周围相邻位置变量之间的相关关系,可以通过统计方法进行空间相关程度的计算,以分析这些变量在空间上的相互关系^[2]。而空间依赖性多用统计参数 Moran's I 表示。Moran's I 的范围是-1 到+1^[16],正值的数值越大表明越高的空间相关性,意味着相邻的位置区域越趋于聚合一起。一个越小的负值表明所研究的数据在空间上是

交互存在的。当 Moran's I 的值为 0 时,意味着在空间上没有相关性,其值越接近 0,相关度越低^[17-18]。由图 4 可见,TN 在 A1 层<6 m 范围内呈正的空间相关性,随距离增大,空间自相关性逐渐减弱;TN 在 A2 层正的自相关距离减小为 5 m。SWC 和 TP 在 A1 和 A2 层呈现出相似的空间自相关特征,只是正负自相关的距离不同。另外,由 A1 到 A2 层,SWC 和 TP 正的自相关距离均增大。

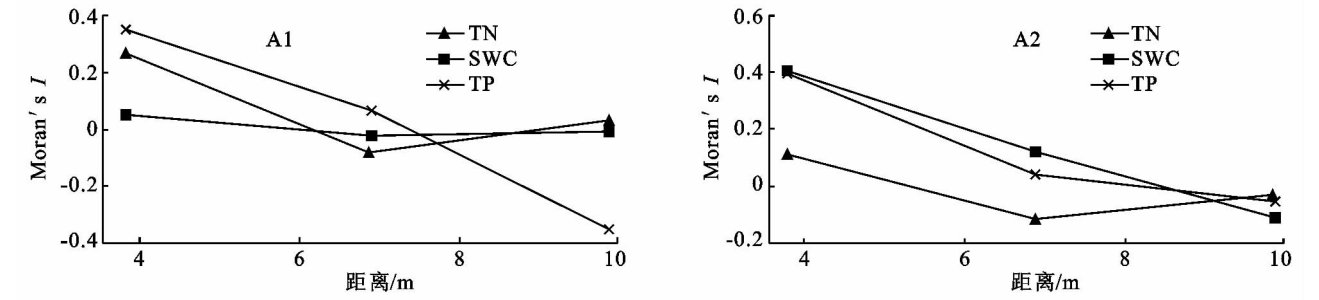


图 4 TN、TP 和 SWC 在 A1 和 A2 的空间自相关关系

土壤 TN、TP 和 SWC 的空间分布信息对土地管理和流域内土壤氮磷流失量评估以及对水质的影响尤为重要^[19-21]。氮磷可能通过迁移流失,例如氮的迁移可能污染地下水,或是通过土壤侵蚀威胁地表水和下游地区用水。各种氮磷流失预测模型的输入参数都是特定地区的,不一定适合陕南南水北调水源区,因此,本研究对陕南地区氮磷流失模型等的应用有一定参考意义。

4 结论

(1) TN 和 SOC 的均值总体上表现为随土层深度的增加而降低;SWC 则相反,表现为随土层深度的增加而增加;TP 随土壤深度的变化不明显。

(2) TN、SWC、SOC 和 TP 的变异系数均在 0.10~1.00 之间,属于中等变异;其块金系数基本都小于 0.25,表明它们均为强空间依赖性。

(3) TN、SWC 和 TP 在 4 个采样深度下,半方差模型对 A1 和 A2 有很好的模拟精度。SOC 的空间结构则较差,不能用半方差模型进行很好的模拟。

(4) 经 Kriging 插值分析,TN、SWC 和 TP 在 A1 和 A2 主要呈层状分布;从 A1 到 A2,TN 平均含量由 0.598 g/kg 减小为 0.310 g/kg,SWC 和 TP 的平均含量则分别从 12.988%,0.229 g/kg 增大到 15.439%,0.366 g/kg。

(5) 随土层深度的增加,TN 由 A1 到 A2 正的相关距离变小,而 SWC 和 TP 的正自相关距离均增大。

参考文献:

- [1] 张心昱,陈利顶,李琪,等.不同农业土地利用类型对北方传统农耕地土壤养分含量及垂直分布的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(2):377-381.
- [2] 赵培培.黄土高原小流域典型坝地土壤水分和泥沙空间分布特征[D].陕西杨凌:中国科学院水土保持与生态环境研究中心,2010.
- [3] 张霞,刘晓清,王亚萍,等.秦岭生态功能区水土保持治理效益评价[J].水土保持研究,2012,19(2):86-90.
- [4] 刘明辉,王飞,李锐,等.土石山林区和黄土塬农区不同覆盖类型土壤水分差异性分析[J].水土保持研究,2011,18(3):187-190.
- [5] 范荣桂,王长春,陈书琴,等.巢湖周边地区表层土壤总氮有机质空间分布特征[J].环境科学与技术,2011,34(5):117-120.
- [6] 郭家文,张跃彬,刘少春,等.云南省宁蒗县不同耕层土壤养分的垂直分布[J].土壤通报,2007,38(6):1072-1075.
- [7] 邹俊亮,邵明安,龚时慧.不同植被和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J].水土保持研究,2012,18(6):12-17.
- [8] 高超,朱继业,朱建国.极端降水事件对农业非点源污染物迁移的影响[J].地理学报,2005,60(6):991-996.
- [9] 王海斌.不同水土保持措施下径流小区降雨与产流产沙关系研究[J].水土保持研究,2011,18(5):63-66.
- [10] 宫渊,张君,陈林武.嘉陵江上游不同植被类型小流域典型降雨产流特征分析[J].水土保持学报,2010,24(2):35-39.
- [11] 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.
- [12] Gao X J, Hu X F, Wang S P, et al. Nitrogen losses from flooded rice field[J]. Pedosphere, 2002, 12(2): 151-156.
- [13] 赵军,刘焕军,隋跃宇,等.农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J].水土保持学报,2006,20(2):41-44.
- [14] 杨奇勇,杨劲松.不同尺度下耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征[J].水土保持学报,2010,24(6):100-104.
- [15] 李保国,胡克林,陈德立,等.农田土壤表层饱和导水率的条件模拟[J].水利学报,2002,36(2):36-40.
- [16] Cliff A. Spatial Processes[M]. London: Pion., 1981: 266.
- [17] 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, China[J]. Geoderma, 2009, 150(1/2): 141-149.
- [18] Moran P A. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. Biometrika, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [19] Bennett L T, Adams M A. Indices for characterising spatial variability of soil nitrogen semi-arid grasslands of Northwestern Australia[J]. Soil Biol. Biochem., 1999, 31(5): 735-746.
- [20] Page T, Haygarth P M, Beven K J. Spatial variability of soil phosphorus in relation to the topographic index and critical source areas: sampling for assessing risk to water quality[J]. J. Environ. Qual., 2005, 34(6): 2263-2277.
- [21] 刘吉平,刘佳鑫,于洋,等.不同采样尺度下土壤碱解氮空间变异研究:以榆树市农田土壤为例[J].水土保持研究,2012,19(2):107-109.