

小流域土壤氮磷空间变异特征分析*

司 涵 张展羽 吕梦醒 冯根祥
(河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要:应用经典统计学与地统计学相结合的方法,以长江下游地区岔河小流域为研究区域,分析了不同土地利用方式下土壤中氮磷含量在0~15 cm和15~30 cm两种深度中的空间分布特征。结果表明:流域内旱地、水田及撂荒地中氮磷含量分布特征差别很大,变异系数迥异;氮和磷的空间分布均为各向异性,长轴方向多为东北-西南;对于0~15 cm土壤层,长轴变程在750~950 m之间,变程从大到小依次为全磷、铵态氮、全氮、有效磷、硝态氮;小流域全氮高含量值主要集中在流域南部水田较为集中的地方,含量梯度与坡面径流方向一致;而全磷受农业耕作及土壤颗粒迁移的双重影响,在小流域南部及北部旱作区聚集的地方分别出现高值区;全氮、全磷在3种耕作方式下呈现出相似的结构性,且水田中正相关尺度均大于旱地,空间正相关尺度与变异系数表现出很好的一致性。

关键词:非点源污染 农田类型 空间变异 地统计学

中图分类号: S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0090-07

引言

氮、磷运移特征的研究已成为当前国内外农业水土环境污染研究的热点之一^[1-4]。众多学者通过室内实验和模型的方法对土壤中氮磷含量分布特征作了研究^[5-6]。但由于土壤并非是一个均质体,而是一个时空连续的变异体,具有高度的空间异质性,因此,在研究和分析区域土壤肥力特征时,经典统计学不适应结构分析方面的研究^[7-8]。

地统计学是以区域化变量理论为基础,以半变异函数为主要工具,研究在空间上既有随机性又有结构性的自然现象的科学,目前已在土壤养分空间分析上得到了广泛的应用^[9-12]。Huang等^[13]采用地统计学方法分析了浙江省丽水市土壤中磷素含量的空间结构和相关性,并进行了克里格插值。王彩绒等^[14]以太湖典型地区蔬菜地为研究对象,采用传统统计和地统计学相结合的方法,研究了土壤氮素及pH值的空间变异特征。已有研究大多是在大尺度空间范围,其取样间距及空间分析结果不能反映田间尺度氮磷空间变异规律,而在小流域尺度,研究大多是在同种土地利用下进行的实验,较少涉及农田类型对土壤氮磷空间结构的影响。

本文以长江下游地区岔河小流域为研究区域,应用经典统计学与地统计学相结合的方法研究3种

土地利用方式下土壤中氮磷含量的空间结构特征,获取各养分含量的空间分布图,并对每种农田耕作类型中氮磷含量进行空间自相关分析,探索土壤中氮磷聚集特征,旨在农业生产田间管理及非点源污染模型的建立提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

岔河小流域位于江苏省溧水县白马镇境内,北纬31°34'~31°37',东经119°10'~119°12'(见图1),流域总面积为4.087 km²,年平均气温15.4℃,年日照量2 240 h,无霜期237 d,生长期可达250 d左右,年平均降水量1 052.6 mm,6—9月份降水较为集中。小流域内山丘个体低矮离散,平均高程28 m,为宁镇低山丘陵区典型的农业小流域。土壤以黄棕

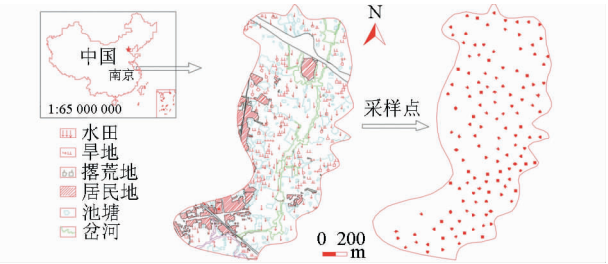


图1 岔河小流域土地类型及采样点分布图
Fig.1 Land use and samples distribution in study area

收稿日期: 2013-04-04 修回日期: 2013-05-10
* 国家自然科学基金资助项目(51179050)和水利部公益性行业专项经费资助项目(201201091-03)
作者简介: 司涵, 博士生, 主要从事农业非点源污染研究, E-mail: sihan.101@163.com
通讯作者: 张展羽, 教授, 博士生导师, 主要从事灌溉排水理论及技术研究, E-mail: zhanyu@hhu.edu.cn

壤为主,农田耕作土壤主要是潴育型水稻土(具体理化性质见表 1)。其中耕作层厚约 15 cm,土壤疏松,容重较小,孔隙度较大,有利于作物根系伸展,同时土壤表层气体交换通畅,利于养分吸收;而犁底层分布在 15~30 cm 处,容重达 1.64 g/cm³,此层土壤较为紧实,渗透系数较小,可防止水分、养分的大量渗漏,又可保持一定的渗透速度,使水分、空气不断更新^[15]。

表 1 岔河小流域农田土壤理化性质

Tab.1 Soil physical and chemical properties in farmland of Chahe watershed

层次	深度 /cm	pH 值	土壤粒径组成/%			有机质质 量分数/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
			砂粒	粉粒	粘粒		
耕作层	0~15	5.5	8.6	67.4	24.1	1.38	1.29
犁底层	15~30	6.9	14.8	66.3	18.9	0.44	1.64

注:表中砂粒粒径 50 μm 以上;粉粒粒径 2~50 μm;粘粒粒径 0~2 μm。

小流域的土地利用方式以农业耕作为主,其中水田约占总面积的 50%,旱地主要种植作物为大豆,仅在北部地区存在少量的茶园,约占 30%,其余部分为居民地和撂荒地。流域内部水塘与农田排水沟道串联构成了整个小流域的沟塘排水网络系统,最终汇聚于小流域的排水主干道——岔河,出口位于流域最南部,整个小流域具有良好的封闭性。

1.2 样品采集与测定

由于流域面积较小,成土母质和土壤类型较为单一,因此主要考虑农业种植方式因素的影响,采用 GPS 定位,共布设采样点 131 个(图 1),其中包括水田 57 个,旱地 56 个,撂荒地 18 个,样点间距在 100~150 m 之间,为减小采样误差,每一个样点在 10 m 范围内采用“s”方式选取 5 点,将采集的 5 点样品按耕作层(0~15 cm)和犁底层(15~30 cm)分别混合,各取 10 kg 左右。采样时间为 2010 年 9 月,此时作物已进入收获阶段,未被利用的氮磷较易随坡面径流、扩散及淋溶作用在土壤中迁移,对土壤养分的空间结构影响较大。

将采集的样本送回实验室,放入 4℃ 冰箱保存,并尽快进行实验分析。铵态氮(AN)测定用靛酚蓝法;硝态氮(NN)用苯酚二磺酸法;取风干土样过 100 目筛用于全磷(TP)含量的测定(HClO₄—H₂SO₄消煮和钼锑抗比色法);过 20 目筛用于测定有效磷(AP)含量(0.5 mol/L 的 NaHCO₃浸提法);过 0.149 mm 筛测定全氮(TN)含量(半微量开氏法)^[16]。

1.3 计算与数据分析

1.3.1 描述性统计分析

数据的描述性统计分析在 SPSS(version 11.5)

中完成,并用 K-S 方法对数据作正态分布检验。地统计学要求原始数据符合正态分布,否则会导致比例效应。比例效应的存在,主要使实际变异函数值产生畸变,使基台值和块金值增大,并使估计精度降低,导致空间结构特征不明显。

1.3.2 半方差函数分析及空间插值

在对土壤养分含量空间插值之前,首先进行半方差函数分析。半方差函数的基本公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (1)$$

式中 $\gamma(h)$ ——半方差函数

h ——步长

$N(h)$ ——相距为 h 的样点对数目

$Z(x_i)$ ——区域化变量 $Z(x)$ 在位置 x_i 处的实测值

$Z(x_i + h)$ ——区域化变量 $Z(x)$ 在位置 $x_i + h$ 处的实测值

根据式(1)计算出的实验半变异函数值,只是不同方向上一些不连续的点,还必须经过拟合得出理论模型,才能较好地分析区域化变量的空间变异性,应用的半方差模型包括:

球状模型

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & (h = 0) \\ C_0 + C(1.5h/a - 0.5h^3/a^3) & (0 < h \leq a) \\ C_0 + C & (h > a) \end{cases} \quad (2)$$

指数模型

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & (h = 0) \\ C_0 + C(1 - \exp(-h/a)) & (h > 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 C_0 ——块金值 a ——变程

C ——基台值与块金值的差值

当 $h \geq a$ 时,说明采样间距过大,不能反映整个区域真实的空间变异特征。

根据半方差函数分析的结果进行克里格插值,得出整个小流域氮磷空间分布特征。模型拟合及空间插值主要在 SPSS(version 11.5)和 ARCGIS 9.3 中完成。

1.3.3 空间自相关分析

空间自相关分析是用来反映空间临近区域某一变量属性值的相似程度和空间分布的聚集特征^[17-18]。应用 Moran's I 系数对 3 种不同土地利用方式下氮磷含量进行空间自相关分析,以获得土壤中氮磷含量聚集特征,其算法可定义为

$$I = \frac{\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S_i^2 \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n w_{ij}} \quad (4)$$

式中 I ——Moran's I 系数
 n ——观察值数目
 x_i, x_j ——在位置 i, j 的观察值
 $\bar{x}$ ——观察值的算术平均值
 S_i^2 ——观察值的方差
 w_{ij} ——空间权重矩阵的元素

Moran's I 的取值范围为 $-1 \sim 1$, $I < 0$ 表示该变量在空间上存在负相关, $I > 0$ 为空间正相关, $I = 0$ 代表空间无关。

2 结果与分析

2.1 描述统计分析

对 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层数据进行统计分析, 结果见表 2。在 0 ~ 15 cm 土层中, 全氮、硝态氮在 3 种耕作方式下平均含量相差不大, 且变异系数均较小, 全氮变异系数在 20.23% ~ 40.13% 之间, 硝态氮在 58.16% ~ 95.16% 之间, 均属中等强度变异, 其中撂荒地最大。由于硝态氮在土壤中以水溶态为主, 且土壤带负电荷, 对硝态氮的吸附作用较小, 因此易受淋溶作用影响。尤其是在稻田中更

易随径流流失, 其含量均值显著低于撂荒地 ($P < 0.05$), 因此在农业耕作中更应注意稻田的氮素流失。而铵态氮中铵离子带正电, 主要以吸附态形式吸附在土壤颗粒表面, 因此铵态氮的流失主要以扩散为主, 平均含量从大到小依次为水田、旱地、撂荒地, 且水田的变异系数较大, 为 154.53%, 撂荒地为 63.53%, 各土地利用方式下铵态氮含量无显著性差异 ($P < 0.05$)。同氮素的含量相比, 耕作方式对土壤中磷素含量影响较大。其中, 全磷平均含量从大到小依次为水田、旱地、撂荒地, 且变异系数均较小, 在 19.21% ~ 32.51% 之间。由于土壤中的磷主要以吸附态存在, 在土壤中移动性极小, 随渗漏而淋失的量也极微, 因此全磷较为稳定, 含量与施肥有很大关系。对于有效磷, 水田中平均含量低于旱地, 但仍然高于撂荒地, 变异系数为 140.91%, 属强程度变异, 撂荒地变异系数最小, 为 86.21%。有效磷虽在全磷中比例很小, 但却易溶于水中并被植物吸收利用, 且易受坡面径流影响, 尤其是在水田, 相当一部分有效磷溶于表层水中, 因此显著低于旱地水平且变异系数较大。

表 2 土壤氮磷指标描述性统计结果
Tab.2 Descriptive statistical results of soil nitrogen and phosphorus

指标	土地利 用方式	0 ~ 15 cm					15 ~ 30 cm				
		平均值 ± 标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 值	平均值 ± 标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 值
TN	旱地	2.34 ± 0.90 ^a	38.59	1.06	0.96		2.06 ± 0.66 ^a	31.88	0.34	0.35	
	水田	2.49 ± 0.50 ^a	20.23	0.28	0.76	0.86 *	2.20 ± 0.61 ^a	27.51	0.08	0.80	0.51 *
	撂荒地	2.22 ± 0.89 ^a	40.13	1.14	0.79		2.22 ± 0.47 ^a	21.18	0.90	-0.66	
NN	旱地	10.25 ± 6.71 ^a	65.48	1.63	3.10		7.29 ± 4.30 ^a	58.96	0.95	1.09	
	水田	8.57 ± 4.99 ^b	58.16	0.93	-0.18	0.93 *	6.44 ± 3.49 ^a	54.19	0.26	-1.02	0.58 *
	撂荒地	13.23 ± 12.59 ^a	95.16	2.15	4.65		7.88 ± 4.87 ^a	61.87	1.28	1.66	
AN	旱地	5.07 ± 5.75 ^a	113.41	4.34	20.27		2.87 ± 3.73 ^a	129.65	2.36	5.59	
	水田	9.75 ± 15.07 ^a	154.53	2.76	8.38	0.90 **	3.52 ± 5.03 ^a	142.84	2.53	6.71	1.03 **
	撂荒地	1.94 ± 1.23 ^a	63.53	1.06	1.51		1.58 ± 1.77 ^a	111.81	1.45	0.87	
TP	旱地	432.52 ± 140.61 ^{ab}	32.51	0.14	-1.03		341.14 ± 144.65 ^a	42.40	-0.21	-1.26	
	水田	468.84 ± 90.09 ^a	19.21	0.94	0.23	0.45 *	433.73 ± 164.01 ^a	37.81	1.25	2.02	0.38 *
	撂荒地	267.12 ± 71.58 ^b	26.8	0.45	-3.25		304.01 ± 43.90 ^a	14.44	-1.08	1.48	
AP	旱地	18.70 ± 22.92 ^a	122.54	2.50	6.14		15.55 ± 19.38 ^a	124.68	1.80	2.33	
	水田	7.75 ± 10.92 ^b	140.91	3.32	12.80	1.17 **	6.24 ± 9.43 ^b	151.23	3.12	11.14	0.99 **
	撂荒地	4.34 ± 3.74 ^b	86.2	1.37	1.50		7.18 ± 9.25 ^{ab}	128.80	2.27	5.24	

注: TN 值单位为 g/kg, 其余为 mg/kg; 显著性分析同列相同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异不显著; * 表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上呈正态分布, ** 表示经对数转换后在 $\alpha = 0.05$ 水平上呈正态分布。

对于 15 ~ 30 cm 土层, 土地利用方式对土壤中氮磷含量影响较小, 除有效磷外, 其余氮磷含量在各耕作方式中均无显著性差异。相对于表层土壤, 全氮和硝态氮虽在土壤中易受淋溶作用的影响, 但由于植物对养分的吸收利用, 其平均值仍有所减少; 铵态氮在 3 种耕作方式下均值明显减小; 而全磷及有效磷在旱地和水田中均值明显减小, 但在撂荒地中

却有微弱增加。

统计分析结果表明, 土壤养分含量受耕作施肥等因素影响较大, 铵态氮、有效磷在 3 种土地利用方式下多属于强变异, 且在两层土壤中偏度和峰度距零值存在较大偏差。在 SPSS 中对样本进行正态分布检验。Kolmogorov - Smirnov (K - S) 检验结果表明, 土壤中铵态氮及有效磷呈现对数正态分布, 其

余数据为标准正态分布。

2.2 土壤氮磷空间变异结构分析

经过对数转换后,应用半方差函数理论对各层氮磷含量进行分析,表 3 为根据变异函数理论模型得出的相应参数,图 2 为全氮及全磷在两层土壤中华方差函数图。由拟合结果可知,各含量

在空间分布均为各向异性,因此表中参数值均以长轴为准。

土壤各养分含量的半变异函数均用球状或指数模型拟合,除硝态氮外,其余决定系数均在 0.65 以上,说明模型的选取基本符合要求,而硝态氮在小流域内空间相关性较差。

表 3 土壤氮磷变异函数的理论模型和参数

Tab.3 Theoretical model and parameters of soil N and P variogram									
土层深度/cm	变量	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	长轴方向	长轴变程/m	短轴变程/m	$C_0 / (C_0 + C)$	决定系数 R^2
0 ~ 15	TN	球状	12. 45	17. 58	NE - SW	835. 89	265. 15	0. 71	0. 658
	NN	指数	38. 83	61. 41	N - S	759. 53	191. 59	0. 63	0. 615
	AN	球状	0. 45	0. 60	NE - SW	852. 29	251. 81	0. 76	0. 758
	TP	球状	318. 51	535. 24	NE - SW	932. 67	378. 70	0. 60	0. 759
	AP	球状	13 769. 00	17 811. 40	NE - SW	802. 75	246. 92	0. 77	0. 705
15 ~ 30	TN	球状	133. 91	252. 92	NW - SE	699. 00	244. 93	0. 53	0. 694
	NN	指数	15. 08	16. 99	N - S	736. 21	144. 28	0. 89	0. 571
	AN	球状	0. 28	0. 40	NE - SW	1 079. 63	316. 87	0. 71	0. 695
	TP	球状	86. 69	192. 30	NE - SW	1 373. 49	560. 25	0. 45	0. 753
	AP	球状	14 306. 00	22 325. 10	N - S	995. 69	332. 51	0. 64	0. 714

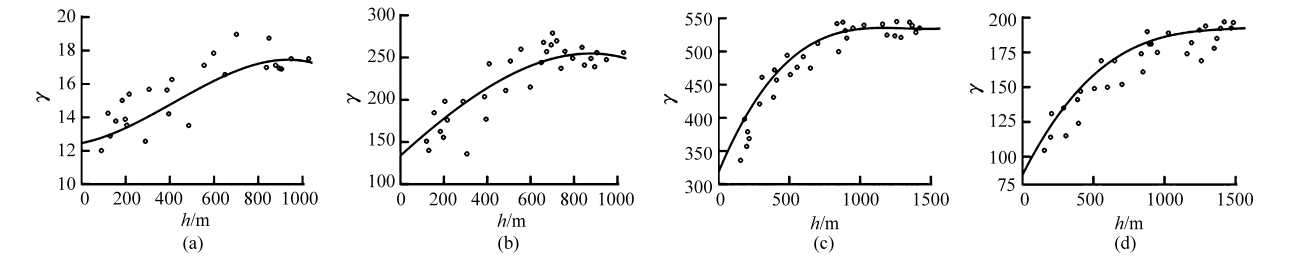


图 2 土壤全氮及全磷半方差函数图

Fig. 2 Semivariogram of soil TN and TP

(a) TN, 0 ~ 15 cm (b) TN, 15 ~ 30 cm (c) TP, 0 ~ 15 cm (d) TP, 15 ~ 30 cm

由表 3 可知,土壤中各养分长轴方向多为东北-西南,造成此现象的原因主要是由于地势地形的影响,整个小流域南北狭长,且经过整个雨季的冲刷,氮磷等营养物随径流逐渐向南部出口汇聚,对流域内土壤中养分含量的空间分布影响很大。

对于表层土壤来说,长轴变程在 750 ~ 950 m 之间,变程大小依次为全磷、铵态氮、全氮、有效磷、硝态氮。深层土壤变程范围较广,仍以全磷最大,长轴变程为 1 373. 49 m,说明全磷在较大的范围内具有空间相关性,全氮、硝态氮相对于土壤表层变程均有所减小,其他 3 种养分变程显著增加。各层土壤养分含量变程均大于采样间距,说明样点能够反映小流域的空间变化特征。

块金值与基台值之比通常作为衡量变量空间相关程度的尺度,若其值小于 25%,则为空间强相关;25% ~ 75% 为空间中等强度相关;大于 75% 为弱相关^[19-20]。小流域内各土壤养分含量的块基比均在 45% 以上,其中,0 ~ 15 cm 土层中铵态氮、有效磷和

15 ~ 30 cm 中硝态氮的块基比在 75% 以上,说明这些元素的空间分布受随机因子的影响程度较高,由于本实验采样点间距均在土壤养分含量变程范围内,因此造成此现象的原因除采样、测量过程中的误差外,主要受到较强人为活动的干扰,削弱了原有的空间相关性,农业耕作中的种植制度、耕作、施肥等措施决定着土壤中的氮磷含量空间分布。对于 15 ~ 30 cm 土层,除硝态氮外其余含量的块基比均小于表层土壤,可能是由于淋溶作用的影响,使得深层土壤中硝态氮含量的空间结构更差,在小范围内忽高忽低,而其他养分含量在深层土壤中相对于表层土壤受人因素干扰较轻。

2.3 土壤氮磷含量空间分布

根据半变异函数拟合参数对各层养分含量进行克里格插值,结果见图 3。在 0 ~ 15 cm 土层中,全氮的高含量区主要集中在南部,呈现出从上游向小流域出口逐渐递增的趋势,受降雨径流及土壤颗粒的迁移影响严重;硝态氮虽然也受坡面径流的影响,但

分布较为零散,空间结构性不强,在北部小部分地区含量较低;铵态氮在整个流域中呈带状分布,中部和北部含量明显偏高,这可能与作物种植方式有关。相对于氮素,磷素在小流域内含量分布略有不同。全磷在北部出现高值区,一方面是由于全磷在土壤中不易迁移,另一方面是北部地区旱地作物中有少量茶园,施肥量偏高,对克里格插值

的结果产生了一定的影响;有效磷受坡面径流影响,在南部流域出口处含量较高。对于 15 ~ 30 cm 土层,氮素相对于表层土壤含量变化梯度较小,且分布较为零散,尤其是硝态氮及铵态氮,空间结构较差,而全磷及有效磷空间分布梯度较为明显,全磷仍在北部存在高值区,有效磷与表层土壤空间分布差异较小。

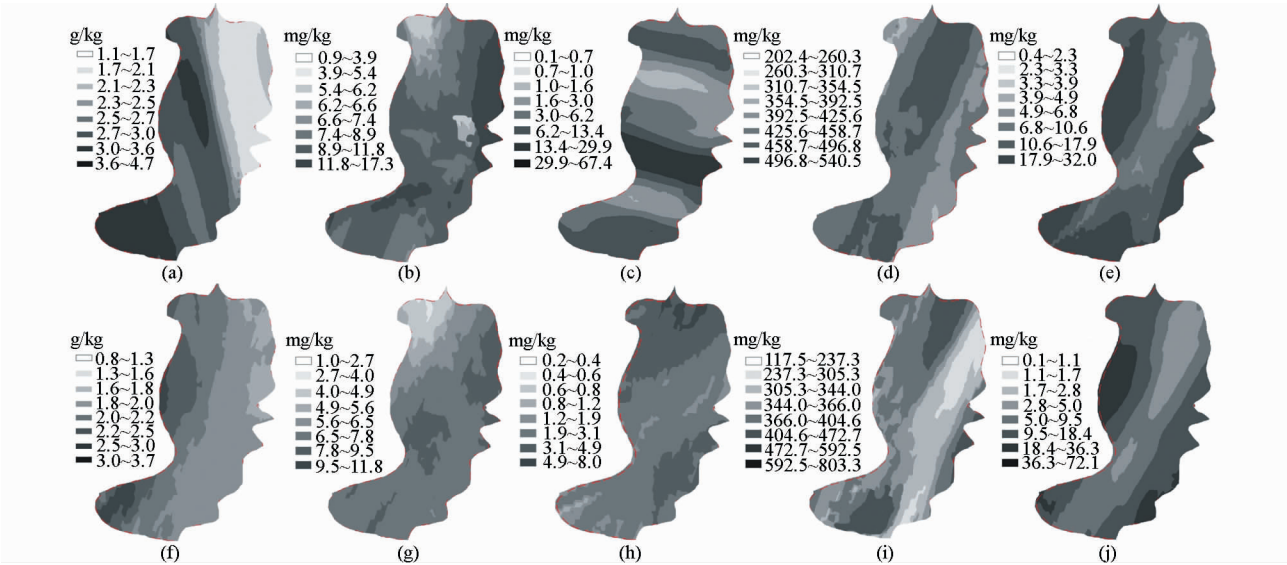


图 3 土壤氮磷含量空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of soil N and P content

(a) TN, 0 ~ 15 cm (b) NN, 0 ~ 15 cm (c) AN, 0 ~ 15 cm (d) TP, 0 ~ 15 cm (e) AP, 0 ~ 15 cm
(f) TN, 15 ~ 30 cm (g) NN, 15 ~ 30 cm (h) AN, 15 ~ 30 cm (i) TP, 15 ~ 30 cm (j) AP, 15 ~ 30 cm

2. 4 不同土地利用方式下氮磷空间自相关分析

对旱地、水田、撂荒地 3 种土地利用方式下土壤中全氮及全磷空间自相关特征分析结果见图 4。

土壤中全氮、全磷在 3 种耕作方式下呈现出相似的结构性,距离较近的采样点之间呈显著正空间自相关,随距离增加,自相关系数变负并达到显著负相关,距离进一步增加,相关程度减小。3 种土地利

用方式下表层土壤全氮正相关尺度相差不大,其中水田正相关尺度为 350 m,略大于旱地及撂荒地,350 ~ 1 100 m 之间呈现负相关;全磷仍以水田最大,正相关尺度为 560 m,旱地为 330 m;在深层土壤中,水田及旱地相对于表层土壤变化不大,撂荒地中正相关尺度明显增加。由图 4 可知,全氮及全磷在水田中的正相关尺度均大于旱地。

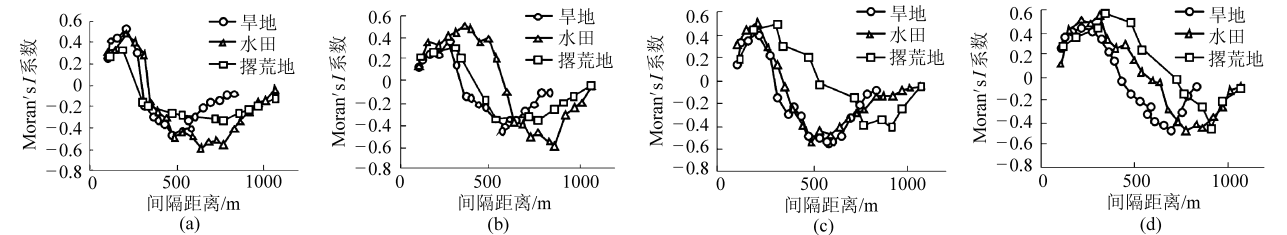


图 4 不同土地利用方式下全氮与全磷空间自相关图

Fig. 4 Spatial correlogram of TN and TP in different land uses

(a) TN, 0 ~ 15 cm (b) TP, 0 ~ 15 cm (c) TN, 15 ~ 30 cm (d) TP, 15 ~ 30 cm

自相关分析同上述半变异函数得出的空间相关尺度明显缩短,但两者并不矛盾,主要由于空间自相关分析为单一土地利用方式下得出的结论,且空间自相关方法在衡量自相关时更为严格。在正相关尺

度范围内其氮磷含量变化特征相差不大,因此可采取相同的管理措施。同时发现,空间正相关尺度与变异系数表现出很好的一致性,在 3 种土壤中,随着变异系数的增大,正相关尺度减小。

3 结论

- (1) 流域内旱地、水田及撂荒地土壤中氮磷含量分布特征差别很大,且变异系数迥异。通过半方差分析可以看出,土壤中各含量在空间分布均为各向异性,长轴方向多为东北-西南;对于表层土壤来说,长轴变程在 750 ~ 950 m 之间,变程从大到小依次为全磷、铵态氮、全氮、有效磷、硝态氮,小流域氮磷含量空间分布受到较强人为活动的干扰。
- (2) 克里格插值结果表明,小流域全氮高含量

值主要集中在流域南部水田较为集中的地方,含量梯度与坡面径流方向一致;而全磷受农业耕作及土壤颗粒迁移的双重影响,在小流域南部及北部旱作区聚集的地方分别出现高值区。

(3) 全氮、全磷在 3 种耕作方式下呈现出相似的结构性;表层土壤全氮正相关尺度相差不大,在 250 ~ 350 m 之间,全磷在 330 ~ 560 m 之间,且水田中正相关尺度均大于旱地;空间正相关尺度与变异系数表现出很好的一致性。

参 考 文 献

1 Darilek J L, Huang B, Li D C, et al. Effect of land use conversion from rice paddies to vegetable fields on soil phosphorus fractions[J]. *Pedosphere*, 2010,20(2):137-145.

2 陈翠英,江永真,袁朝春. 土壤特性空间变异性研究[J]. *农业机械学报*,2005,36(10):121-124.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen, Yuan Chaochun. Study on soil property spatial variability using R language[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005,36(10):121-124. (in Chinese)

3 Wang H J, Huang B, Shi X Z, et al. Major nutrient balances in small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008,81(3):203-218.

4 韩建刚,李占斌. 紫色土丘陵区不同土地利用类型小流域氮素流失规律初探[J]. *水利学报*,2011,42(2):160-165.
Han Jian'gang, Li Zhanbin. Process characteristics of nitrogen loss by runoff in different land use watersheds in purple soil hilly region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011,42(2):160-165. (in Chinese)

5 Richard M, Stephen T. Variation of phosphorus loss from a small Catchment in south Devon, UK[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000,79(2-3):143-157.

6 Ouyang W, Huang H B, Hao F H, et al. Evaluating spatial interaction of soil property with non-point source pollution at watershed scale: the phosphorus indicator in Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 432: 412-421.

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 blacksoil, China —a case study at Hailun County[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004,24(6):53-57. (in Chinese)

8 孔莉莉,张展羽,朱磊. 水文过程中灌区农田非点源氮的归趋研究进展[J]. *水科学进展*,2010,21(6):853-860.
Kong Lili, Zhang Zhanyu, Zhu Lei. Review of the trends in the study of non-point source nitrogen in hydrological processes on farm land over irrigation district[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6):853-860.

9 Kenan K, Engin Ö, Fevzi A. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004,76(1):1-11.

10 Wei Y C, Bai Y L, Jin J Y, et al. Spatial variability of soil chemical properties in the reclaiming marine foreland to Yellow Sea of China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(9):1103-1111.

11 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤矿质氮空间变异性[J]. *农业工程学报*,2010,26(6):89-96.
She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Spatial variability of soil mineral nitrogen in a small catchment in the wind-water erosion crisscross zone of Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*,2010,26(6):89-96. (in Chinese)

12 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. *农业机械学报*,2010,41(7):57-63.
She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Spatial variability of soil water content on a cropland-grassland mixed slope land in the Loess Plateau, China [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7):57-63. (in Chinese)

13 Huang L D, Wang H Y, Li Y X, et al. Spatial distribution and risk assessment of phosphorus loss potential in urban-suburban soil of Lishui, China[J]. *CATENA*, 2012, 100:42-49.

14 王彩绒,吕家珑,胡正义,等. 太湖流域典型蔬菜地土壤氮及 pH 空间变异特征[J]. *水土保持通报*,2005,19(3):17-20.
Wang Cairong, Lü Jialong, Hu Zhengyi, et al. Spatial variability of soil nitrogen and pH in vegetable field in typical area of Taihu Lake watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005,19(6):17-20. (in Chinese)

15 孔莉莉. 灌区非点源氮的归趋机理及模型研究[D]. 南京:河海大学,2011.
Kong Lili. Study on the fate mechanism and model of non-point source nitrogen over irrigation district[D]. Nanjing: Hohai University, 2011. (in Chinese)

16 佩奇 A L. 土壤分析法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1991.

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 陈云坪,王秀,马伟,等. 小麦多年产量空间变异与空间关联分析[J]. 农业机械学报,2010,41(10):180-184.
Chen Yunping, Wang Xiu, Ma Wei, et al. Spatial autocorrelation analysis of wheat yield over five years [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10):180-184. (in Chinese)

19 陈树人,肖伟中,朱云开,等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析[J]. 农业机械学报,2008,39(10):140-143.
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):140-143. (in Chinese)

20 Antonio G, Rocio P. Spatial variability of soil elements in two plant communities of NW Spain[J]. Geoderma, 2007,139(1-2): 199-208.

Spatial Variability of Soil Nitrogen and Phosphorus in Small Watershed

Si Han Zhang Zhanyu Lü Mengxing Feng Genxiang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract: Geo-statistics combined with classical statistics were applied to analyze the spatial distribution of soil nitrogen (N) and phosphorus (P) content under three different land uses in Chahe watershed at the lower Yangtze River. The results showed that soil N and P content distribution varied significantly in paddy, upland, and vacant land, while the coefficient of variation also varied greatly among the three land uses. All spatial distributions of N and P content values were anisotropic and directions of most long axes were northwest-southeast. Major ranges in topsoil were between 750 ~ 950m with the order of total P (TP) > ammonia N (AN) > total N (TN) > available P (AP) > nitrate N (NN). Higher content of TN was mainly concentrated in the southern part of the small watershed and the gradient direction was consistent with the direction of surface runoff, while distribution of TP was significantly affected by farming and soil particle movement, and the high level of TP was appeared in the accumulation area of the south of small watershed and the north of arid region. TN and TP showed similar structural characteristics under the three farmland types, while both the autocorrelation scales in paddy land were larger than those in upland. Variation of spatial autocorrelation scales showed good consistency with the coefficient of variation. Research results provided a scientific basis for the control of N and P losses in agricultural production and the establishment of non-point source pollution model.

Key words: Non-point source pollution Farmland type Spatial variability Geo-statistics