

小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性研究

王云强^{1,2}, 张兴昌^{1,3*}, 李顺姬³, 张景利³

(1. 中国科学院水土保持与生态环境研究中心(西北农林科技大学水土保持研究所)黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 为掌握小流域土壤特性与地形因子的关系及其空间变异规律, 采用经典统计学与地统计学相结合的方法, 对黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性进行了系统研究, 结果表明: ①硝态氮的变异程度为强变异性, 铵态氮、坡度、坡向则为中等变异性, 土壤类型、土地利用对矿质氮的变异程度有极显著影响; ②各研究特性在采样尺度内表现出不同程度的空间依赖性, 铵态氮、海拔为强烈的空间依赖性, 而硝态氮、坡度及坡向则为中等的空间依赖性; ③分维数与空间异质比所揭示的结果具有一致性, 各变量的分维数从大到小依次为: 硝态氮(1.982 6) > 坡向(1.976 7) > 坡度(1.942 0) > 铵态氮(1.879 1) > 海拔(1.746 1); ④硝态氮在 0°与 90°, 45°与 135°方向上具有各向同性结构, 而海拔为各向异性结构, 其余的研究特性则表现出微弱的各向异性; ⑤海拔、铵态氮具有很强的空间自相关性, 硝态氮则为空间不相关; 硝态氮与铵态氮、坡度与坡向之间具有极显著的正相关性, 而铵态氮与海拔、坡度与海拔之间则为显著的负相关, 表明在水蚀风蚀交错带铵态氮和坡度的空间分布具有海拔梯度性。

关键词: 矿质氮; 地形; 空间变异性; 地统计; 分维数

中图分类号: X142; X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1567-06

Spatial Variability and the Relationships of Soil Mineral N and Topographic Factors in a Small Watershed

WANG Yun-qiang^{1,2}, ZHANG Xing-chang^{1,3}, LI Shun-ji³, ZHANG Jing-li³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: Objective of this study was to understand the spatial pattern of soil properties and topographic factors and their relationships in a small watershed. We used classical statistical coupling with geo-statistical theory to characterize and compare the spatial variability of soil mineral N and topographic factors in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau. The results show that: ① The nitrate's variable extent is strong while other properties are moderate variability, and the impacts of soil types, land uses on variable extent are significant. ② All properties have different spatial dependence extent in the study area. Ammonium and elevation are strong spatial dependence while nitrate, slope gradient and slope aspect are moderate spatial dependence. ③ The analysis results of fractal dimension and spatial heterogeneity proportion are coherent, and the decreased sequence is: nitrate (1.982 6) > slope aspect (1.976 7) > slope angle (1.942 0) > ammonium (1.879 1) > elevation (1.746 1). ④ In 0°/90°, 45°/135° aspects, nitrate is isotropy while elevation is anisotropy, and others are weak anisotropy. ⑤ Ammonium and elevation have strong spatial autocorrelation while nitrate has not. There exist extremely notable positive correlations between nitrate and ammonium, slope gradient and aspect, and the negative correlations between ammonium, slope aspect and elevation, which indicate that the distribution of ammonium and slope gradient have elevation gradients.

Key words: mineral N; topographic; spatial variability; geostatistics; fractal dimension

土壤矿质氮一方面对土地生产力、植物生长、水体富营养化以及非点源污染具有重要影响; 另一方面, 小流域景观尺度下的土壤氮素具有高度的时空异质性^[1, 2], 并且这种异质性因具有一定的等级巢式结构而表现为尺度的函数^[3~5]. 研究小流域土壤矿质氮的空间变异性, 是提高土壤氮素利用率、指导小流域精细农业、环境保护以及有效治理非点源污

染等过程中的重要一环, 从而成为国际上的研究热

收稿日期: 2006-07-28; 修订日期: 2006-09-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB106803); 国家科技支撑计划项目(2006BAD09); 西北农林科技大学科研创新团队支持计划项目

作者简介: 王云强(1981~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤性质空间变异, E-mail: wangyuncq04@mails.gucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

点之一^[6~10]。

一些学者对不同尺度上不同土地利用方式^[11]、土壤类型^[12]、植被类型^[13,14]下土壤氮素的空间变异性进行了大量的研究,并采用不同的方法和理论来描述其空间变异状况,都取得了长足的进展。但这些研究大都为环境因子对土壤氮素时空变异性的影响研究,并且主要采用了经典统计方法,而对于土壤氮素与地形因子的关系及其空间依赖性的研究较少。鉴于此,本研究采用经典统计学与地统计学相结合的方法,在水蚀风蚀交错带六道沟小流域进行高密度采样,对土壤硝态氮和铵态氮的空间变异性进行系统研究,并分析其与地形因子的关系及地形因子自身的空间变异性。试图掌握各研究特性之间的关系以及自身的空间分布特征和变异规律,深化在小流域景观尺度上地形因子对土壤养分循环过程的理解,提高小流域土壤氮素的利用效率,以期为合理安排植被布局、黄土高原生态恢复及其非点源污染有效治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为中国科学院水土保持研究所神木野外试验站所处的六道沟小流域,该流域位于神木县以西 14 km 处,北依长城,地处毛乌素沙漠的边缘。流域面积为 6.886 4 km²,经度 110°21′ ~ 110°23′,纬度 38°46′ ~ 38°51′,年均气温 7 ~ 9 ℃,年均降雨 437.4 mm,且 6 ~ 9 月可占全年降水量的 70% ~ 80%,该区暴雨洪水和干旱灾害频繁发生,水蚀、风蚀、重力侵蚀全年交替进行,既是黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心,又为典型的脆弱生态环境区。地貌类型为片沙覆盖的梁峁状黄土丘陵,地面组成物质以第四纪黄土沉积物为主,主要土壤类型有绵沙土、黄绵土、风沙土以及坝淤土,植被类型属于灌丛草原类型,然而天然植被大部分已遭破坏,后经人工整治,现已逐渐发展成为以长芒草-草木樨状黄芪-达乌里胡枝子-茵陈蒿-柠条为主的植被演替阶段。

该流域土壤的颗粒组成极不均匀,以细砂粒或粉砂为主,其中大于 0.05 mm 的粗粉砂含量高达 50% ~ 90%,物理性粘粒、粘粒的绝对含量也不低,但土壤无结构,结持力小;流域表层土壤容重为 1.26 ~ 1.42 g·cm⁻³,总孔隙度一般在 50.0% 以下,土壤 pH 一般在 8.50 以上^[15]。土壤性质不同,保持矿质态氮的能力就会不同,充分把握这些土壤性质对于矿质氮在土壤中的分布、迁移转化具有一定参考

价值。

1.2 样品采集与测定

在六道沟流域以 100 m × 100 m 的网格进行布点,并将网格图输入双频 RTK-GPS 定位仪,然后利用双频 RTK-GPS 定位仪导航,找到每个网格的中心进行采样,采样时用直径为 5 cm 的土钻在每个网格中心及其东南西北 4 个方向约 30 cm 处各采 1 个点,采样深度为 0 ~ 20 cm。将 5 个样点混合均匀后作为 1 个土样,除人力所不能到达的区域(如水库、焦化厂、砖厂等)外,共采集 689 个土样。同时用罗盘仪测定采样点的坡度和坡向,并记录采样点的土壤类型、土地利用和植被类型,而每个采样点的海拔、经度及纬度则从 GPS 定位仪中提取,采样时间为 2005-09-17 ~ 2005-10-05。图 1 为采样点分布。

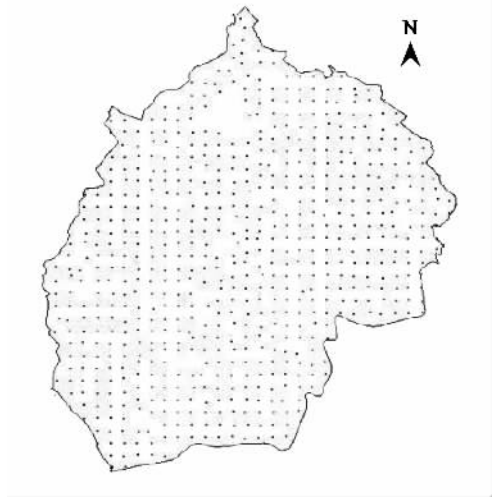


图 1 采样点分布
Fig.1 Grids of sampling

样品自然风干后,去除石块、残根等杂物,用四分法取样约 300 g 作为待测样品备用。然后准确称取过 1 mm 筛的土样 10.00 g,用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提、流动注射分析仪(Auto Analyzer 3-aa3)测定样品中的硝态氮和铵态氮含量。本研究采用 Excel 2000 和 SPSS13.0 计算各变量的描述性统计特征值、Pearson 相关系数以及对数据进行正态性检验;利用 DPS 数据处理系统进行地统计学分析,并计算相应的参数(变程、块金值、基台值、分维数等)。

2 结果与讨论

2.1 小流域土壤矿质氮及地形因子空间变异的经典统计学分析

经典统计学是进行空间变异性分析最早采用的一种方法,该理论认为取样越靠近的两点的土壤性

质比取样较远的两点更相似.土壤特性的均值既是其量值大小的体现,又可以代表研究尺度内土壤特性数据的集中趋势.由表 1 可见,六道沟流域土壤硝态氮的平均含量为 $7.54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远小于土壤铵态氮的含量($26.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),这与 2 种氮素形态自身的理化性质、陆地水文过程以及微地形有关.对土壤硝态氮、铵态氮和各个地形因子的数据采用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)正态分布检验概率进行检验,并对不服从正态分布的数据进行自然对数转换后,结果表明:在 95% 的显著水平上经自然对数转换后的土壤硝态氮、铵态氮均服从正态分布,而海拔、坡向及经自然对数转换后的坡度均服从近似正态分布.

变异系数 $CV(\%)$ 是描述区域化变量空间变异程度的一个主要指标.根据 Nielsen 的划分标准^[16],当 $CV\leq 10\%$ 时为弱变异性,当 $10\% < CV < 100\%$ 时

为中等变异性,当 $CV\geq 100\%$ 时为强变异性.从表 1 可见,土壤矿质氮和地形因子的变异系数为 $3\% \sim 167\%$ 之间,表现出显著的变异性,其中硝态氮的变异系数为 167% ,为强变异性;铵态氮、坡度、坡向的变异系数介于 $10\% \sim 100\%$ 之间,为中等变异性;而海拔的变异系数最小(3%),为弱变异性.造成这种现象的原因主要有:① 由于带负电的土壤颗粒对硝态氮的吸附、保持能力较小,使得硝态氮在降雨或灌溉作用下容易随水淋失或流失,在坡脚和沟道处富集,这种富集后再分配的过程加剧了硝态氮的变异性;② 六道沟流域地貌类型为梁峁状黄土丘陵,其相对高程仅为 239 m ,加之取样时不能够到达深沟地区,减缓了海拔的变化幅度,所以海拔的变异性较小,而坡度、坡向又是其沟壑纵横特征的很好体现,表现出较大的空间异质性.

土壤中矿质氮的变异程度较大,除了上述的原

表 1 六道沟流域土壤矿质氮和地形因子的统计特征值¹⁾

Table 1 Statistics of soil mineral N and topographic factors in the Liudaogou watershed								
指标	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值	最大值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	分布类型
硝态氮	7.54	0.14	242.85	12.61	167.30	11.42	186.63	n
铵态氮	26.06	9.34	106.01	8.88	34.07	0.03*	1.55*	N
						2	11.32	n
海拔	1 170.15	1 000	1 239.08	36.96	3.16	0.21*	0.44*	N
						-0.98	1.66	n
坡度	10.35	0	70	9.32	90.08	1.29	3.71	NN
坡向	136.81	0	355	123.35	90.16	-0.93*	1.14*	n
						0.29	-1.48	n

1) * 表示经过自然对数转换;n 表示服从近似正态分布;N 表示服从正态分布;NN 表示非正态分布

因外,还可能是由于六道沟流域明显不同的土壤类型、土地利用方式之间的差异造成的.为此,本文将不同土壤类型及土地利用方式下的硝态氮、铵态氮的均值列于表 2,由该表可见,土壤硝态氮、铵态氮的平均值均按下列土壤类型顺序显著($p < 0.01$)减

小:坝淤土>绵沙土>黄绵土>风沙土,也按下列土地利用方式显著($p < 0.01$)减小:农地>退耕草地>灌木地>撂荒地.土壤类型、土地利用对土壤矿质氮空间变异性具有显著影响,这与李兆富、陈效民等^[11,12]的研究结果一致.此外,水蚀风蚀交错带丘陵

表 2 六道沟流域不同土壤类型、土地利用方式和植被类型下的土壤矿质氮含量

Table 2 Concentration of soil mineral N for different soil types, land uses and slope position in the Liudaogou watershed

项目	分类	样本数/个	硝态氮		铵态氮	
			均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差
土壤类型	坝淤土	46	2.76	1.02	5.89	0.27
	绵沙土	319	1.74	0.12	5.69	0.11
	黄绵土	156	1.17	0.11	4.73	0.11
	风沙土	161	1.06	0.08	4.54	0.13
土地利用	农地	84	2.75	0.23	5.77	0.27
	退耕草地	124	1.44	0.11	5.46	0.14
	灌木地	150	1.10	0.12	4.70	0.14
	撂荒地	159	0.99	0.11	4.59	0.09
坡位	坡中	163	1.57	0.17	5.3	0.17
	坡上	156	1.35	0.12	5.26	0.14
	坡下	258	1.32	0.10	5.15	0.10

沟壑区景观尺度上地形的复杂性也是造成土壤硝态氮、铵态氮空间变异的因素之一,在六道沟流域,土壤矿质氮在不同坡位间的大小顺序为:坡中>坡上>坡下,造成这种结果的原因主要有:①与研究区域的坡面特征有关.坡下往往不是整个坡体的最低点,而是侵蚀沟的沟岸地,于是,在坡下汇集的矿质态氮不能够有效地富集起来,而是随径流被带入沟底;②在降雨径流作用下,坡下所获得的径流量比其它坡位大,这加剧了坡下自身的淋溶和侵蚀程度,致使其矿质氮含量比坡上还小,而坡中矿质氮含量较高主要与坡上矿质氮的汇集以及自身的淋溶和侵蚀程度较小有关.

2.2 小流域土壤矿质氮及地形因子空间变异的地统计学分析

经典统计学理论有力地推动了土壤学、生态学和水文学等学科的发展,但它建立在样本独立且服从正态分布的基础上,不足以分析变量的空间变异性及尺度效应.而地统计学的引入较好地解决了这个问题,它是以区域化变量和随机函数为基础,以半方差函数为基本工具的一种统计方法^[17].关于地统计学的基本理论详见文献^[18, 19],这里不再赘述.通过地统计分析软件计算出区域化变量的半方差以后,利用4种比较成熟的半方差理论模型(球状模型、指数模型、高斯模型、线性模型)对半方差结果进行拟合.由于决定系数是回归平方和占总平方和的比值,反映了理论模型与实验变异函数拟合程度的高低^[20],因此本研究按照决定系数最大的原则选取最佳拟合模型,进而确定半方差函数的重要参数(变程、基台值、块金值和分维数等),并利用这些参数来进行区域化变量的空间变异性分析.

表3为六道沟流域土壤矿质氮和各个地形因子

的地统计分析结果,由表3可见,在黄土高原水蚀风蚀交错带小流域景观格局上,土壤矿质氮和各个地形因子都表现出不同程度的空间依赖性.用指数模型对铵态氮的拟合效果最佳,其变程、空间异质比 $[C_0/(C_0+C)]$ 分别为972 m、22%,表明在平均采样距离为100 m内的随机变异所占比例较小,而结构变异性比例较大,为78%.按照Cambardella^[21]的划分标准,即当 $C_0/(C_0+C) \leq 25\%$ 时,表示强的空间依赖性,当 $25\% < C_0/(C_0+C) < 75\%$ 时,表示中等的空间依赖性,当 $C_0/(C_0+C) \geq 75\%$ 时,表现为较弱的空间依赖性,可知土壤铵态氮具有很强的空间依赖性.对比4个模型的拟合效果可以发现,除铵态氮外,土壤硝态氮和所有地形因子用球状模型进行拟合的效果最佳,其中海拔的变程最大,坡向的变程最小,分别为1701 m和260 m.在这些特性中除海拔的空间异质比最小(7%),表现出强的空间依赖性外,铵态氮、硝态氮、坡度及坡向的空间异质比分别为22%、70%、73%和36%,均呈现出中等的空间依赖性.变程是研究样本区域相似性的指标,表示在不同尺度上环境因子所影响的区域,其值在不同的研究区域和取样尺度下有所不同^[22].各研究特性之间变程不同的主要原因在于:①沿海拔和地形梯度上生命因素和非生命因素的综合影响(如植物生长、降水、蒸散速率、土壤含水量等);②是小流域微地貌、土壤特性和土壤侵蚀等异质性相互作用的结果^[23].空间异质比的不同是由引起土壤矿质氮和地形因子变异的随机性因素(如施肥、耕作措施、种植制度等)与结构性因素(如气候、母质、土壤类型等)的差异所造成的,这些因素在不同的尺度上反映了不同的控制格局.

表3 六道沟流域土壤矿质氮和地形因子的地统计分析结果¹⁾

Table 3 Geo-statistics analysis results of soil mineral N and topographic factors in the Liudaogou watershed									
指标	理论模型	块金值	基台值	变程/m	空间异质比	决定系数	各向异性比		分维数
							$K_1(h)$	$K_2(h)$	
硝态氮	球状	0.433	0.622	1 024	69.59	0.803 4 **	1.016 3	0.990 5	1.982 6
铵态氮	指数	0.042	0.190	972	22.00	0.875 5 **	0.812 0	1.120 7	1.879 1
海拔	球状	113.377	1 552.812	1 701	7.30	0.959 2 **	1.220 7	0.720 9	1.746 1
坡度	球状	0.347	0.474	1 631	73.08	0.603 2 **	1.085 2	0.893 0	1.942 0
坡向	球状	4 410.275	12 338.982	260	35.74	0.652 4	0.963 4	1.164 5	1.976 7

1) ** 表示在 $p < 0.01$ 的水平下显著; $K_1 = N0^\circ E/N90^\circ E$; $K_2 = N45^\circ E/N135^\circ E$

半方差函数作为地统计分析的一个关键函数,它不仅是区域化变量之间取样间隔 h 的函数,也是其方向的函数^[24].本研究以正北方向为 0° 方向,采用各向异性比 $K(h)$ 来描述小流域景观中各向异性

结构的特点,其计算公式为:

$$K(h) = \gamma(h, \theta_1) / \gamma(h, \theta_2)$$

式中, $\gamma(h, \theta_1)$ 和 $\gamma(h, \theta_2)$ 分别为2个方向 θ_1 和 θ_2 上的变异函数.如果 $K(h)$ 等于或接近于1,则其空

间异质性为各向同性的,否则为各向异性^[18].从表 3 可知,在 0°与 90°方向,土壤硝态氮和坡度、坡向的 $K_1(h)$ 接近于 1,说明它们在此方向上具有各向同性结构,而铵态氮和海拔在此方向上的 $K_1(h)$ 偏离 1 较远,表现出一定的各向异性结构;在 45°与 135°方向,除硝态氮表现出明显的各向同性以外,铵态氮和坡度、坡向则具有微弱的各向异性结构,而海拔表现出明显的各向异性结构[$K_2(h) = 0.7209$],即 135°方向的变异高于 45°方向.区域化变量各向异性的存在与否主要取决于不同方向上几个过程中的主要控制过程的变化,而这些控制过程是通过不同的景观格局来体现.硝态氮在 4 个方向上的各向同性结构说明在这 4 个方向上对硝态氮空间变异的主要控制过程是相同的;而海拔在 4 个方向上的各向异性结构又说明不同方向对海拔变异的主要控制过程有所不同.

分维数 D 是半方差函数的一个重要参数,它的大小表示变异函数曲线的曲率,可作为样本随机变异的度量,计算公式为: $2\gamma^*(h) = h^{(4-2D)}$.分维数 D 值越小,表示土壤特性之间的随机变异越小,均一性程度越好;相反, D 值越大,表示土壤特性之间的随机变异越大,均一性程度越差.从表 3 可见,小流域土壤矿质氮和地形因子的分维数从大到小依次为:硝态氮(1.9826) > 坡向(1.9767) > 坡度(1.9420) > 铵态氮(1.8791) > 海拔(1.7461),这表明硝态氮的随机变异最大,坡向、坡度次之,而海拔最小,随机变异的减小趋势表明结构变异所占的比例在逐渐增加,空间依赖性呈逐渐增强的趋势,这与用空间异质比所表征的空间依赖状况基本一致,特别是在划分空间依赖性的程度上,二者均说明海拔和铵态氮具有强的空间依赖性而硝态氮的依赖性较弱,这表明分维数与空间异质比所揭示的结果具有内在一致性.

2.3 空间相关性分析

空间相关性分析的目的就是确定变量是否在空间上相关及其相关程度如何.本研究采用 Moran 的 I

系数^[7,22]和 Pearson 相关系数来分别描述土壤矿质氮和各地形因子的空间自相关程度及彼此之间的相关性.Moran 的 I 系数可用来定量地描述事物在空间上的依赖关系,其值介于 -1 和 1 之间,小于 0 表示负相关,等于 0 表示不相关,大于 0 表示正相关.图 2 为六道沟流域各研究特性的 Moran 的 I 系数与滞后距离的关系,该图显示,随着尺度的增加,海拔、铵态氮在样本间距为 1 200 m 时由正相关转变为负相关;坡度、坡向则由正相关(< 600 m)逐渐过渡为不相关后再转变为正相关(> 3 200 m);而硝态氮在整个尺度内的 Moran 的 I 系数近似为 0,表现为近似的空间不相关.这些结果与经典统计中变异系数的结果基本吻合,即变异系数越大,变异性越强,在空间位置上表现出的空间独立性就越明显.但是经典统计结果不能够体现其尺度效应,而通过 Moran 的 I 系数与滞后距离的关系图却能够很好地描述其尺度效应,并揭示更多相关的空间信息.

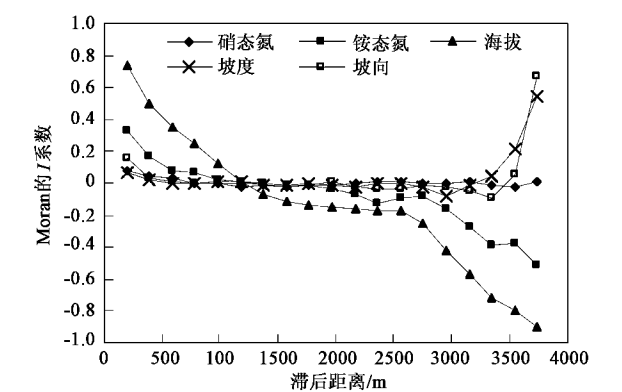


图 2 Moran 的 I 系数与滞后距离的关系
Fig.2 Graph between Moran's I and lag h

为了更好地说明土壤矿质氮与各个地形因子的相关性,将 Pearson 相关系数的计算结果列于表 4,由该表可见,土壤硝态氮与铵态氮,坡度与坡向之间都存在着极显著($p < 0.01$)的正相关性,其相关系数分别为 0.303 7、0.238 9,表明土壤特性、环境因子内部各变量间存在着相互依赖性;而铵态氮与海拔、坡

表 4 六道沟流域土壤矿质氮及各个地形因子之间的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 4 Pearson correlations among soil mineral N and topographic factors in the Liudaogou watershed					
指标	硝态氮	铵态氮	海拔	坡度	坡向
硝态氮		0.303 7 **	-0.005 1	-0.071 7	-0.067 4
铵态氮			-0.079 4 *	-0.007 6	-0.021 5
海拔				-0.136 3 **	0.028 4
坡度					0.238 9 **
坡向					

1) * 相关系数在 0.05 的水平上显著(二尾检验); ** 相关系数在 0.01 的水平上显著(二尾检验)

度与海拔之间存在着较大的负相关性,其相关系数为-0.079 4、-0.136 3,这表明在水蚀风蚀交错带小流域土壤铵态氮和坡度的空间分布具有海拔梯度性.变量间相关性的显著与否是流域生态系统中各个影响因子综合作用的结果,这些因子在宏观上包括水文气象因子、植被景观因子等,微观上包括微地形、小气候、生物小循环等.值得注意的是,与变量的空间自相关一样,变量间的相关性也与取样间距尺度有关^[22].

3 结论

(1) 经典统计分析表明:硝态氮的变异程度为强变异性,铵态氮、坡度、坡向则为中等变异性,并且土壤类型、土地利用方式对矿质氮的变异程度有极显著影响.

(2) 土壤矿质氮和各地形因子在采样尺度内都表现出不同程度的空间依赖性,其中铵态氮、海拔为强烈的空间依赖性,而硝态氮、坡度及坡向均为中等的空间依赖性.

(3) 各研究特性的分维数从大到小依次为:铵态氮(1.982 6) > 坡向(1.976 7) > 坡度(1.942 0) > 铵态氮(1.879 1) > 海拔(1.746 1),表明分维数与空间异质比所揭示的结果具有内在一致性.

(4) 土壤硝态氮在0°与90°,45°与135°方向上具有各向同性结构,而海拔为各向异性结构,其余变量则表现出微弱的各向异性结构.

(5) 相关分析表明:海拔、铵态氮具有很强的空间自相关性,而硝态氮近似为空间不相关;硝态氮与铵态氮、坡度与坡向之间具有极显著($p < 0.01$)的正相关性,而铵态氮与海拔、坡度与海拔之间则为显著的负相关,这表明在水蚀风蚀交错带土壤铵态氮和坡度的空间分布具有海拔梯度性.

参考文献:

[1] 王东红,黄清辉,王春霞,等.长江中下游浅水湖泊中总氮及其形态的时空分布[J].环境科学,2004,25(增刊):27~30.

[2] Mathieu O, Lévêque J, Hénault C, *et al.* Emissions and spatial variability of N₂O, N₂ and nitrous oxide mole fraction at the field scale: revealed with ¹⁵N isotopic techniques[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006,38(5):941~951.

[3] Brejda J J, Moorman T B, Smith J L, *et al.* Distribution and Variability of Surface Soil Properties at a Regional Scale[J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64:974~982.

[4] 张玉铭,毛任钊,胡春胜,等.华北太行山前平原农田土壤养分的空间变异性研究[J].应用生态学报,2004,15(11):2049

~2054.

[5] 雷咏雯,危常州,李俊华,等.不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J].土壤,2004,36(4):376~381.

[6] 曲丽梅,姚德,丛丕福.辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价[J].环境科学,2006,27(2):263~267.

[7] 谢花林,李波,刘黎明.基于空间统计学和GIS的农牧交错带土壤养分空间特征分析——以内蒙古翁牛特旗为例[J].水土保持学报,2006,20(2):73~76.

[8] 朱益玲,刘洪斌,江希流.江津市紫色土中N、P养分元素区域空间变异性研究[J].环境科学,2004,25(1):138~143.

[9] Hailelassie A, Priess J, Veldkamp E, *et al.* Assessment of soil nutrient depletion and its spatial variability on smallholders' mixed farming systems in Ethiopia using partial versus full nutrient balances[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 108:1~16.

[10] Bengraïne K, Marhaba T F. Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, B100:179~195.

[11] 李兆富,杨桂山,李恒鹏.西苕溪流域土地利用对氮素输出影响研究[J].环境科学,2006,27(3):498~502.

[12] 陈效民,吴华山,孙静红.太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J].环境科学,2006,27(6):1217~1222.

[13] 初玉,杨慧玲,朱选伟,等.浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的空间异质性[J].生态学报,2005,25(12):3294~3300.

[14] Kopáček J, Stuchlík E, Wright R F. Long-term trends and spatial variability in nitrate leaching from alpine catchment-lake ecosystems in the Tatra Mountains (Slovakia-Poland)[J]. Environmental Pollution, 2005, 136:89~101.

[15] 刘玉民.神木水蚀风蚀交错带生态环境整治技术及试验示范研究论文集[M].西安:陕西科学技术出版社,1993.40~43.

[16] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[M]. Pudoc Wageningen, 1985. 2~30.

[17] 潘成忠,上官周平.黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J].农业工程学报,2003,19(6):5~10.

[18] 张仁铎.空间变异理论及应用[M].北京:科学出版社,2005.4~6.

[19] 李哈滨,王政权,王庆成.空间异质性定量研究理论与方法[J].应用生态学报,1998,9(6):651~657.

[20] 许红卫,高克异,王珂,等.稻田土壤养分空间变异与合理取样数研究[J].植物营养与肥料学报,2006,12(1):37~4.

[21] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58:1501~1511.

[22] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J].农业工程学报,2005,21(8):11~16.

[23] Wang Hongqing, Hall C A S, Cornell J D, *et al.* Spatial dependence and the relationship of soil organic carbon and soil moisture in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico[J]. Landscape Ecology, 2002, 17:671~684.

[24] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[J]. Advance in Soil Science, 1985,3:1~70.