

水蚀风蚀交错带土壤—植被系统氮素空间变异特征

高海龙^{1,2}, 王辽宏^{1,2}, 张兴昌^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 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: 采用经典统计学和地统计学相结合的方法, 分析了黄土高原水蚀风蚀交错带本氏针茅草坡地土壤—植物系统氮素沿坡面的分布, 并从不同空间尺度研究了土壤—植物系统氮素的空间结构特征, 以揭示水蚀风蚀交错带草坡地土壤—植物系统氮素分布特征。研究结果表明, 随坡位的降低, 草坡地植物生物量、植物氮含量和储量均逐渐增加; 土壤有机质和全氮含量在坡上部和坡中部相近, 但均低于坡底部; 土壤硝态氮和铵态氮含量沿坡面呈先降低而后在坡底部迅速增加的变化趋势。这些变量的变异系数除硝态氮和铵态氮以坡中部最小外, 均以坡底部最小, 表明坡底部土壤—植物系统氮素分布最为均匀。各变量的最佳拟合模型在3个分析尺度上均保持一致, 且随分析尺度的增加, 块金常数、块金效应逐渐增大, 样点间的空间依赖性逐渐减弱, 空间相关性减弱。表明水蚀风蚀交错带草坡地土壤—植物系统氮素在不同尺度上空间结构比较稳定, 属中等或强空间相关性, 其空间变异主要来源于结构性因素。

关键词: 水蚀风蚀交错带; 本氏针茅草坡地; 土壤—植物系统; 氮素空间变异

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0281-06

中图分类号: S158.2

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.058

Spatial Variability of Nitrogen in Crisscross Region of Plant—Soil System of Water—Wind Erosion

GAO Hai-long^{1,2}, WANG Liao-hong^{1,2}, ZHANG Xing-chang^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Traditional statistics, combined with geostatistics, were applied to analyze the spatial distribution of nitrogen(N) in plant and soil on a *Stipa bungeana* slope in the water—wind erosion crisscross region of the Loess Plateau. The spatial characteristics of the plant—soil system at different spatial scales were studied to reveal characteristics N distribution in the region grassland. Results showed that plant biomass, plant N content, and N stock increased gradually with the decrease of slope position. Soil organic carbon and nitrogen content in the upper and middle positions were similar, lower than those in the bottom position. Soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents performed a V-shaped change, with the highest content being on the upper slope. Except nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents, the variation coefficients of those variables measured to be the lowest on the bottom slope, which indicates that N distribution of plant—soil system was uniform on the bottom slope. Furthermore, the best fit models for each variable were precisely consistent at the three scales. Nugget effect increased, while spatial dependence between different sample points and spatial correlation weakened gradually with the increase of analysis scale. These results indicate that N in plant and soil have relatively stable spatial structures at different spatial scales and are characterized by medium or strong spatial correlation, and its spatial variation is mainly caused by structural factors.

Keywords: water—wind erosion crisscross region; *Stipa bungeana* slope; plant—soil system; spatial variability of N

黄土高原水蚀风蚀交错带是黄土高原侵蚀最严重的地区, 该区气候变化剧烈, 植被稀疏, 全年水蚀风蚀交替进行, 且相互促进, 是典型的脆弱生态环境

区^[1]。近年来该区开展的退耕还草措施在草地生态系统恢复和环境改善方面起到重要作用, 但退耕还草的效果在很大程度上受到当地水热条件和土壤本身

收稿日期: 2013-05-07

修回日期: 2013-05-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“水蚀风蚀交错带典型小流域自然梯度下生源要素循环特征”(40801111); 西北农林科技大学基本科研业务费(QN2011147); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)

作者简介: 高海龙(1987—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤理化性质。E-mail: gaohailong2009888@163.com。

通信作者: 张兴昌(1965—), 男(汉族), 陕西省武功县人, 研究员, 主要从事土壤环境化学的研究。E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn。

肥力的限制^[2]。氮素养分是土壤质量评价的重要指标,也是植被生长必需的营养元素,其在土壤中的含量直接决定了土壤的质量与地上植被的长势,是决定水蚀风蚀交错带植物生长的重要限制因子^[3]。黄土高原水蚀风蚀交错带气候干燥,植被稀少,降雨集中且多以暴雨形式发生,水土流失非常严重^[4],土壤氮素极易随降雨地表径流和侵蚀泥沙等流失^[5],或者以渗漏、淋失等形式迁移到地下水进而造成地下水富营养化^[6]。这些氮素流失极易造成坡面土壤及植物氮素缺乏和下游水体富营养化等危害。因此,需要对该地区坡地土壤—植物系统氮素进行合理管理和氮素流失的准确预测研究,而这些工作的前提取决于土壤—植物系统氮素的空间分布特征分析。目前,对于生态系统营养元素的空间分布研究,国内外多偏重于土壤养分的空间分布特征,如毕珍等^[7]运用地统计学方法研究显示了四川盆地森林土壤中温度和降雨都与有机质密度呈极显著负相关关系,海拔与有机质密度呈极显著正相关关系,温度是影响土壤氮素含量的关键因子。刘吉平等^[8]对三江平原典型环型湿地土壤不同发生层有机碳、全氮、全磷和全钾的空间分布进行研究,发现环形湿地土壤养分空间分布主要受植物体元素含量、生物过程和水文地貌过程的影响。胡克林和李保国^[9-10]、李菊梅和李生秀^[11]等也应用地统计学方法对农田土壤养分的空间分布进行了研究。然而目前对生态系统植物体养分元素以及土壤—植物系统中元素空间分布研究较少,这方面的研究可以加深认识生态系统尺度养分元素的空间分布特征。在氮素空间分布方面,研究者对不同尺度湿地、森林及农田土壤氮素含量空间分布特征作了大量研究,但对草坡地土壤—植物系统及坡地氮素空间分布的研究较少,需要开展深入的研究。本研究应用经典统计学和地统计学方法,分析了黄土高原水蚀风蚀交错带本氏针茅草坡地土壤—植物系统氮素的分布特征及其空间变异规律,旨在为水蚀风蚀交错带草坡生态系统的植被恢复、氮素管理、空间分布和氮素流失预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,试验站位于神木县以西 14 km 处的六道沟小流域流域(38°49'N,110°23'E),海拔 1 081~1 274 m,流域面积 6.89 km²,属中温带半干旱气候,年均气温 8.5 °C,年均降水量 440 mm,其中大部分集中在 6—9 月,是黄土高原风沙区向毛乌素沙地、森林草原向典型干旱草原的过渡地带,为

典型水蚀风蚀区农牧交错带。研究区植被类型为干旱草原,受自然及人为因素影响,天然植被大部分已遭破坏,残存的天然草场也已严重退化、沙化。研究区地貌为风沙覆盖的黄土丘陵沟壑区,坡地占整个流域的 77%,地带性土壤为黑垆土,由于长期受强烈侵蚀,已被绵沙土、新黄土、红土以及在沙地上发育起来的风沙土、坝地淤土取代。

1.2 样品采集与分析

本研究以六道沟流域内一东北向的本氏针茅草坡地为对象,草坡地坡长约 150 m,坡度 20°左右。该坡地退耕前为农耕地之后逐渐演替为本氏针茅种群,生长年限约 20 a。2007 年 9 月份,沿坡面自上而下每隔 5 m 设一个样带,共设 30 个样带。在每个样带内设 5 个样点,采集地上部生物量,称取植物鲜重;同时采集 0—20 cm 土层土壤样品。5 个样点处的植物样和土样分别组成混合样。

为了解研究区域土壤—植被生态系统氮素养分分布特征,本研究选取了植物鲜重、干重、氮素浓度、氮素储量和土壤有机质、全氮、硝态氮、铵态氮 8 个研究指标。植物鲜重采用称重法得出。植物干重通过 105 °C 烘干称重得到。植物氮用凯氏法消化后,用流动注射分析仪(FIAstar5000,瑞典 FOSS 公司)测氮含量。植物氮素储量以植物氮素浓度、生物量(包括湿重和干重)和坡面面积为基础数据算得。土壤有机质用重铬酸钾—外加热法测定,凯氏定氮法发测全氮。土壤硝态氮(NO₃-N)和铵态氮(NH₄-N)采用流动元素分析仪(型号为 AutoAnalyzer 3-aa3,德国 Bran+Luebbe 公司)测定^[6],样地坡度采用罗盘测定,经度和海拔采用 GPS 测定。

1.3 数据处理

应用 Excel 做基本数据统计,SAS V8 数据统计软件完成相关性分析和 Kolmogorov—Smirnov (K—S)正态分布检验概率取显著水平 $\alpha=0.05$ 对数据进行检验。结果表明,土壤植被系统中各变量 P_{k-s} 值均 >0.05 ,服从正态分布(表 1),满足地统计分析要求,可以使用地统计方法进行空间分析。应用 GS+9.0 地统计学软件进行半方差函数分析以及空间自相关性分析并结合 Excel 软件制图。

2 结果与讨论

2.1 土壤—植物系统氮素养分描述性统计特征

水蚀风蚀交错带本氏针茅草坡地土壤—植物系统氮素空间分布与坡位有关。随坡位的降低,草坡地植物生物量、植物氮含量和储量均逐渐增加,土壤有机质和全氮含量在坡上部 and 坡中部相近,均低于坡底

部,土壤硝态氮和铵态氮含量则呈 V 形,且坡上部含量最多(表 1)。表 1 还表明,各坡位土壤硝态氮和铵态氮含量都明显高于全氮含量。此外,生物量、植物氮含量和储量、土壤全氮含量的变异系数均以坡底部最小,植物干重、植物氮含量、土壤全氮含量的方差值均以坡底最小,植物氮储量和鲜重的方差值在坡底部也较小,表明坡底部土壤—植物系统氮分布最为均匀。土壤有机质含量、硝态氮和铵态氮含量的变异系数和方差值均为坡中部最小,表明坡中部土壤有机质、硝态氮和铵态氮分布最为均匀。

本研究中草坡地生物量和植物氮的坡面分布过程与坡面生态学过程和资源分布有关。黄土高原北部水蚀风蚀交错带生态系统主要受水分限制^[12-13]。该区降水主要集中在 6—9 月份且多以暴雨形式发生,极易造成坡面土壤流失。对于典型的坡地生态系统,坡上部和中部为降雨过程中水分和养分的流失区,而坡下部为这些资源的汇集区,因此,坡下部的生物量高于坡中部和上部。而且坡中上部由于水土流

失,水分和养分资源分布不均,空间异质性大,而坡下部水分和养分汇集,分布较为均匀,异质性小。这些过程也影响到植物对氮的富集特征,使得植物氮含量和储量呈现出与生物量一致的坡面分布特征。本研究中土壤氮素的空间分布主要与坡面水土流失过程有关,这是因为黄土高原水蚀风蚀交错带坡地土质疏松,地表径流携带泥沙量大,泥沙对氮素富集力较强,最终导致水土流失过程成为坡地氮素分布变异的主要驱动途径^[6,14]。

本研究中植物生物量、氮含量和氮储量以及土壤有机质含量沿坡顶向下均呈逐渐增加的趋势,土壤全氮含量在坡上部和中部基本不变,而后含量急速增加,这种相似的变化趋势与各变量间的内在关系有关(表 2),而土壤硝态氮和铵态氮含量沿坡顶向下表现为先降低后升高,这可能与土壤无机氮随地表径流、水土流失等的淋失以及无机氮自身迁移运动有关,也可能预示着土壤阶地的形成。土壤阶地是坡面土壤再分布的最终结果,主要表现为坡面土壤的从上向下运动^[15]。

表 1 土壤—植物系统氮素养分含量统计特征

项目	均值				变异系数/%				整个坡面 P _{K-S}
	整个坡面	坡上	坡中	坡下	整个坡面	坡上	坡中	坡下	
植物鲜重	3.35±0.63	2.58±0.39	3.29±0.75	4.18±0.43	37.43	30.62	45.69	24.91	0.529
植物干重	2.35±0.38	1.89±0.34	2.23±0.35	2.93±0.27	32.63	36.31	31.50	23.07	0.518
植物氮含量	15.47±1.65	15.09±2.69	15.41±0.86	15.90±0.54	21.31	33.47	11.99	6.74	0.618
植物氮储量	35.73±6.27	27.71±3.10	32.93±6.67	46.54±4.47	35.09	22.36	40.52	19.22	0.483
土壤有机质	3.41±0.35	3.15±0.37	3.20±0.24	3.88±0.33	20.52	23.32	15.26	16.87	0.500
土壤全氮	0.38±0.04	0.36±0.04	0.36±0.03	0.43±0.03	19.30	22.07	15.25	14.78	0.421
土壤硝态氮	2.77±0.45	3.17±0.68	2.49±0.16	2.66±0.31	32.64	43.08	13.25	23.53	1.080
土壤铵态氮	4.59±0.42	4.85±0.43	4.23±0.25	4.69±0.51	18.16	17.62	11.69	21.65	0.715

注:均值单位为:植物鲜重(t/hm²),植物干重(t/hm²),植物氮含量(g/kg),植物氮储量(kg/hm²),土壤有机质(g/kg),土壤全氮(g/kg),土壤硝态氮(mg/L),土壤铵态氮(mg/L)。

表 2 土壤—植物系统氮素养分的相关性分析

项目	植物鲜重	植物干重	植物氮含量	植物氮储量	土壤有机质	土壤全氮	土壤硝态氮	土壤铵态氮
植物鲜重	1.00	0.95**	-0.09	0.92**	0.39*	0.45*	-0.24	-0.13
植物干重		1.00	-0.24	0.89**	0.41*	0.43*	-0.32	-0.04
植物氮含量			1.00	0.20	-0.18	-0.10	0.47**	0.09
植物氮储量				1.00	0.34	0.41*	-0.12	-0.02
土壤有机质					1.00	0.98**	0.26	-0.08
土壤全氮						1.00	0.30	-0.05
土壤硝态氮							1.00	0.20
土壤铵态氮								1.00

注:*表示在 $p < 0.05$ 水平(双侧)上显著相关;**表示在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关, $n=30$ 。

2.2 土壤—植物系统氮素含量空间变异特征

2.2.1 土壤—植物系统氮素半方差函数分析

为了深入分析各个变量沿草坡地分布的空间结构性和随

机性,对这些指标进行地统计学分析。按最小滞后距 5,10 和 15 m 这 3 个尺度分别计算各变量的变异函数,得到的理论变异模型及检验参数详见表 3。研究

表明各变量对应的最佳拟合模型在 3 个分析尺度上均保持一致,各变量沿坡面的空间结构比较稳定。但不同变量最佳拟合模型不同,如植物生物量、氮储量和土壤硝态氮的最佳拟合模型为指数模型,土壤有机质和土壤铵态氮以球状模型拟合效果最佳,而植物氮含量和土壤全氮含量则以高斯模型拟合效果最好。这与不同变量之间的关系有关,如植物生物量和氮储

量极显著正相关关系(表 2),沿坡面具有相同的空间结构,其最佳模型均为指数模型。本研究中植物氮含量的分布很大程度上依赖于土壤氮素,植物氮储量依赖于土壤全氮,但其最佳拟合模型却不同(表 3),表明在水蚀风蚀交错带典型草坡地变量的空间结构特征不但取决于变量之间的相互作用,还受其它环境因素的影响,如土壤流失、生物富积、微地形、降雨淋溶等。

表 3 土壤-植物系统氮素养分的空间变异理论模型及模型参数

指标	最小滞后距 (h_{\min})/m	模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金效应 (C_0/C_0+C)/%	变程 (A_0)/m
植物鲜重/($t \cdot hm^{-2}$)	5	E	0.152	1.368	11.1	2
	10	E	0.175	1.363	12.8	2
	15	E	0.172	1.371	12.5	3
植物干重/($t \cdot hm^{-2}$)	5	E	0.069	0.442	15.6	3
	10	E	0.073	0.438	16.7	3
	15	E	0.076	0.443	17.2	4
植物氮含量/($g \cdot kg^{-1}$)	5	G	1.000	11.70	8.5	71
	10	G	1.000	11.87	8.5	72
	15	G	1.140	12.59	9.1	77
植物氮储量/($kg \cdot hm^{-2}$)	5	E	103.2	274.0	37.7	66
	10	E	104.3	267.7	39.0	64
	15	E	106.3	283.6	37.5	71
土壤有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	5	S	0.029	0.416	7.0	5
	10	S	0.040	0.415	9.6	5
	15	S	0.044	0.429	10.3	11
土壤全氮/($mg \cdot kg^{-1}$)	5	G	0.003	0.007	49.3	57
	10	G	0.004	0.007	49.9	67
	15	G	0.004	0.008	47.3	72
土壤硝态氮/($mg \cdot L^{-1}$)	5	E	0.193	0.749	25.8	118
	10	E	0.201	0.765	26.3	123
	15	E	0.188	2.386	7.9	243
土壤铵态氮/($mg \cdot L^{-1}$)	5	S	0.461	0.923	49.9	136
	10	S	0.344	0.689	49.9	28
	15	S	0.464	1.465	31.7	311

注: E 代表指数模型, G 代表高斯模型, S 代表球型模型。

根据地统计学理论,在 5, 10, 15 m 这 3 个尺度上,块金值(C_0)随分析尺度的增大而增大,表明随采样密度的减小,由采样尺度引起的误差逐渐增大^[16],被大尺度掩盖的某种较小结构在小尺度上体现出来。总体上,植物氮储量的 C_0 值最大,表明植物氮储量受随机性误差影响较大。这与氮储量受土壤-植物系统各形态氮素影响较大有关。植物鲜重、氮含量与土壤硝态氮和铵态氮的块金值也较大,这可能与植物氮储量与鲜重之间的极显著正相关关系以及土壤-植物系统氮素循环及平衡有关(表 2),而其余变量的 C_0 值较小,表明这些变量本身及采样尺度、测定方法等存在的随机性误差较小。

在本研究的 3 个尺度上,土壤硝态氮的块金效应

C_0/C_0+C 值随最小滞后距基本呈依次减小趋势,表明随着采样密度的增大,样点间的空间依赖性逐渐减弱,空间相关性减小,但均为正块金效应。但对于植物氮含量来说,5 m 尺度上 C_0/C_0+C 值小于 10 m 尺度,说明样点间的空间相关性随采样密度增加而增强^[17],但 15 m 尺度上 C_0/C_0+C 值却最小,这与地上生物量的分布有关。而土壤全氮的 C_0/C_0+C 值,在 10 m 尺度上大于 15 m 尺度,而在 5 m 尺度上最小。可能原因是 10 m 尺度上正好土壤全氮含量的高值和高值相邻或低值和低值相邻,导致样点间空间相关性增强,但结构性降低。植物氮储量、土壤有机质以及土壤铵态氮的 C_0/C_0+C 值则整体上随采样尺度的变化而变化。说明这 3 种指标基本不随采样点密度

的增加而相关性有所增强,即分布比较均匀。植物氮储量、土壤全氮以及土壤硝态氮和铵态氮的空间相关性较弱(C_0/C_0+C 介于 25%~75%)外,其它变量在坡面上均具有强的空间相关性($C_0/C_0+C < 25%$),表明这些变量的空间变异主要由结构性因素引起。余冬立、邵明安^[18]等人对小流域土壤矿质氮的研究同样显示土壤内在属性如土壤母岩矿物和地形对土壤矿质氮的影响较大,但人为因素同样起着重要作用。土壤全氮和土壤铵态氮的块金效应最大,高达 49%,表明结构性与随机性因素对其空间变异的影响基本相当。

变程反映的是变量空间自相关范围的大小,它与

观测和取样尺度上影响土壤植物系统中氮素含量的各种生态过程相联系^[16]。在变程之内,变量具有空间自相关特性,反之则不存在。且变程越大,空间变异结构越好。由表 3 可看出,植物生物量变程最小,说明空间结构性较差。这是因为研究区草地生态系统生产力主要受水分限制,而坡面生态过程显著地改变了坡面水分资源的分布和有效性,其异质性较高,从而使得生态系统生产力(生物量)表现出较差的空间结构。和植物生物量相比,植物氮含量和储量、土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量在坡面分布中受影响因素较少,变程较大,表明其具有较好的空间结构特征(图 1)。

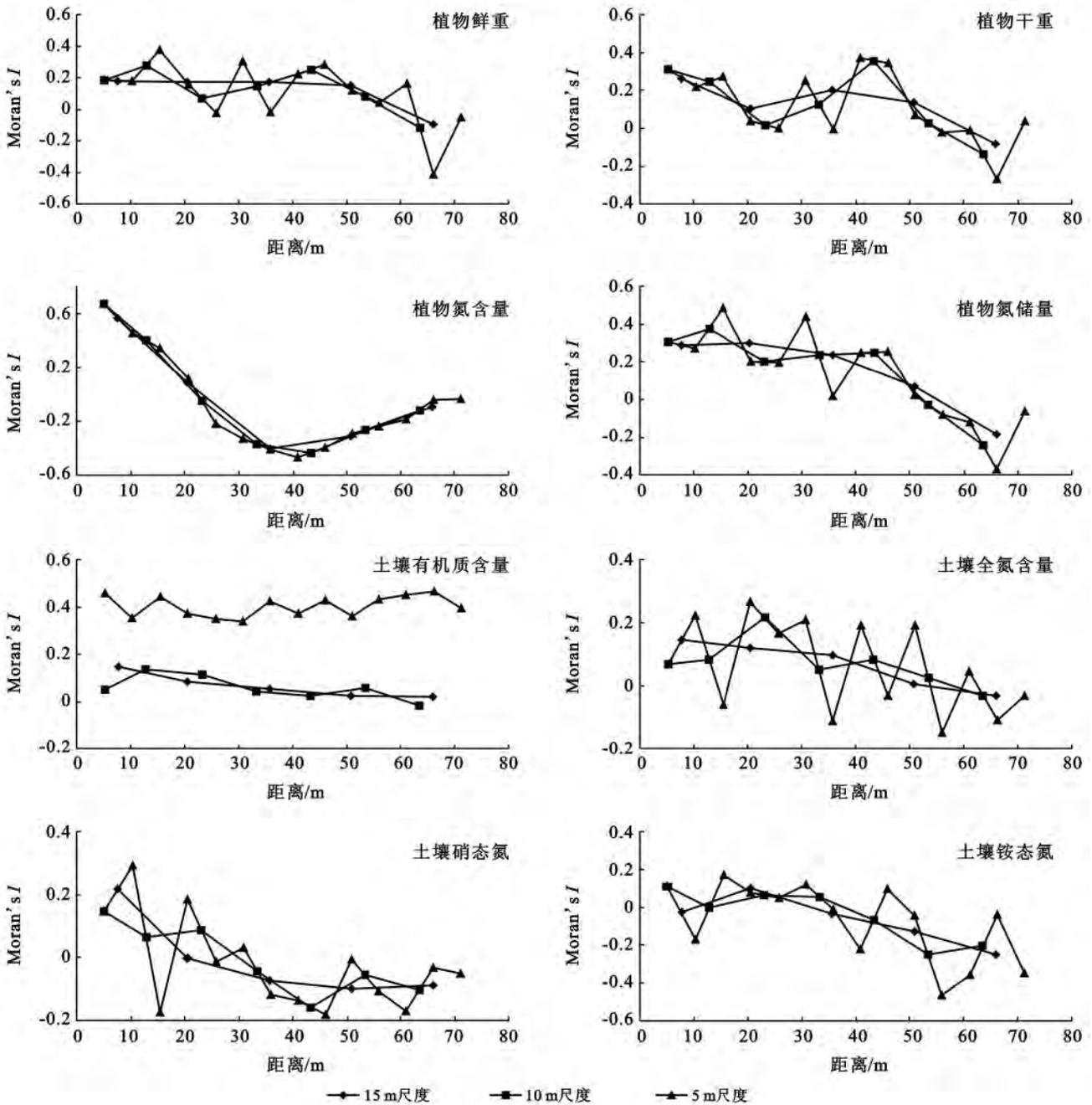


图 1 土壤—植物系统氮素养分空间自相关性分析

2.2.2 土壤—植物系统氮素养分空间自相关分析

不同变量的 Moran's I 指数值和空间自相关范围随分析尺度不同而异(图 1)。植物鲜重和干重在 5, 10 和 15 m 的分析尺度上空间自相关性十分相似, 5 m 尺度上其正自相关范围分别为 0~63 m 和 0~55 m, 负自相关范围分别为 63~71 m 和 55~71 m, 10 m 尺度上分别在 55 和 57 m 处由正自相关转变为负自相关关系, 15 m 尺度上均在 60 m 处由正自相关转变为负自相关关系, 且鲜重的 Moran's I 指数值在 0—50 m 范围内几乎不随空间距离发生变化, 表明该范围内生物量的自相关结构较好。植物氮含量和储量在各个尺度上由正相关转变为负相关分别为: 5 m 尺度时, 25, 53 m 处转变; 10 m 尺度时, 26, 57 m 处转变; 15 m 尺度时, 在 30, 62 m 处转变。随着空间尺度的增大植物氮含量和储量的自相关值均逐渐减弱, 趋势基本一致。土壤有机质的 Moran's I 指数值随空间距离的变化幅较大(图 1), 表明有机质的自相关结构较好, 与半方差分析结论相一致。土壤全氮含量在 5 m 尺度上, 有多个正负自相关转化点, 较近距离的空间正自相关范围即为变量的空间自相关尺度。但整体上正相关 Moran's I 大于负相关 Moran's I 值, 说明土壤全氮含量在负自相关范围内受随机因素影响较大。土壤硝态氮和铵态氮含量在 10 和 15 m 尺度上, 分别在 35, 40 m 以及 20, 41 m 处由正自相关转化为负自相关。而在 5 m 尺度上, 二者均有多个正负自相关范围。且均呈现出随空间尺度增大而自相关关系减弱的趋势。此外, 植物氮鲜重、干重和氮储量的空间自相关图随空间距离的变化趋势相似(图 1), 这与变量间的极显著相关关系有关(表 2)。

3 结论

(1) 水蚀风蚀交错带本氏针茅草坡地土壤—植物系统氮素养分空间分布与坡位有关, 植物生物量、植物氮含量和储量沿坡顶向下呈逐渐增加趋势; 土壤有机质和全氮含量在坡上部和坡中部相近, 在坡底部迅速增加; 土壤硝态氮和铵态氮含量则呈 V 形, 且坡上部含量最多。

(2) 水蚀风蚀交错带本氏针茅草坡地生物量、植物氮和土壤氮素养分在不同分析尺度下的最佳拟合模型各自保持一致, 空间结构稳定, 均属中等或强空间相关性; 空间变异主要来源于地形、气候等结构性因素; 各变量均具有较好的空间自相关特征。水蚀风蚀交错带草坡地土壤—植物系统氮素养分分布特征与坡面水土流失过程有关。

[参 考 文 献]

- [1] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000, 11(1): 11-17.
- [2] 郭彦军, 韩建国. 农牧交错带退耕还草对土壤化学性质的影响[J]. 草地学报, 2008, 16(4): 386-391.
- [3] 王建国, 樊军, 王力, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区植被地上生物量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 556-564.
- [4] 张芳芳, 张丽萍, 王文艳, 等. 水蚀风蚀交错区土壤养分特征与土壤质地及水分关系[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 99-104.
- [5] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因子[J]. 自然科学进展, 2004, 14(3): 294-299.
- [6] 李裕元, 邵明安, 张兴昌. 侵蚀条件下坡地土壤水分与有效磷的空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 41-44.
- [7] 毕珍, 石辉, 许五弟, 等. 四川盆地森林土壤的有机氮素存储及其空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 83-87.
- [8] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原环型湿地土壤养分的空间分布规律[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 247-255.
- [9] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 33-38.
- [10] 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克立格估值[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 460-466.
- [11] 李菊梅, 李生秀. 几种营养元素在土壤中的空间变异[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(2): 58-64.
- [12] 樊军, 邵明安, 王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J]. 草地学报, 2006, 14(3): 261-264.
- [13] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 74-81.
- [14] 孔刚, 王全九, 樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 14-18.
- [15] 王占礼, 邵明安, 李勇. 黄土地区耕作侵蚀过程中的土壤再分布规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 168-172.
- [16] 霍霄妮, 李红, 张微微, 等. 北京耕作土壤重金属多尺度空间结构[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 223-229.
- [17] 刘付程, 史学正, 潘贤章, 等. 太湖流域典型地区土壤磷素含量的空间变异特征[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 77-81.
- [18] 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.