

黄土高原农牧交错带退耕坡地苜蓿-铁杆蒿群落养分分布特征

张燕江^{1,2} 邱莉萍^{1,2} 张兴昌² 程积民²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学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: 植物群落养分的空间分布反映了生态系统物质循环特征, 可以为揭示生态系统资源的有效性及其生态系统中植物群落的演替过程提供依据。本研究以黄土高原农牧交错带退耕坡地苜蓿-铁杆蒿群落为对象, 分析其生物量和养分含量的空间分布特征。结果表明: 退耕地苜蓿-铁杆蒿群落坡上部以苜蓿为主导物种, 坡下部以铁杆蒿为主导物种, 坡中部由二者共同主导。同一植物的生物量和N含量具有相似的空间结构, 并且与植物种类有关; 苜蓿和铁杆蒿P含量均以球状模型最佳, K含量的空间分布均以高斯模型最佳。苜蓿-铁杆蒿群落生物量和养分含量具有较强的空间依赖性, 其空间变异主要由结构性因素决定。苜蓿和铁杆蒿生物量和养分含量的自相关性随距离变化表现出相似的趋势, 但随生物量和养分种类的不同而异, 且铁杆蒿生物量和养分含量的自相关性大于苜蓿。随着人工草地向天然草地的演替, 群落生物量和养分含量的空间自相关性和空间依赖性逐渐增强。

关键词: 农牧交错带; 退耕草地; 养分含量; 空间分布

中图分类号: S181 文献标志码: A

The spatial distribution of nutrients in *Medicago sativa* - *Artemisia sacrorum Ledeb* community along an abandoned slope in the cropping-pastoral ecotone of the Loess Plateau

ZHANG Yan-jiang^{1,2}, QIU Li-ping^{1,2}, ZHANG Xing-chang², CHENG Ji-min²

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

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

Abstract: The distribution of nutrients in plant community could reflect the cycling of nutrients in ecosystems, and thus provide evidence for the availability of soil resources for the ecosystems as well as for the understanding of the evolution of plant community in the ecosystems. In this study, we analyzed the spatial distribution of biomass and nutrients in *Medicago sativa* - *Artemisia sacrorum Ledeb* community along an abandoned slope in the cropping-pastoral ecotone of the Loess Plateau. The objectives were to understand how nutrients were distributed along abandoned grass slope and to establish the relationships between nutrients distribution and community succession. The results showed that the grass communities were dominated by *Medicago sativa* in the upper slope, by *Artemisia sacrorum Ledeb* in the lower slope, and by both of them in the middle slope. Plant biomass and N content had similar spatial distribution patterns, which varied among plant species. The best fit models of the spatial distribution for both *Medicago sativa* and *Artemisia sacrorum Ledeb* were spherical model for P content, and Gaussian model for K content, respectively. The biomass and nutrients contents in the *Medicago sativa* - *Artemisia sacrorum Ledeb* community has a relatively strong spatial dependence. The spatial variability of them was mainly due to the constructional factors. The spatial auto correlations of each variable showed similar trend with distance but varied with varia-

收稿日期: 2014-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271315); 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: 张燕江(1987—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环方面的研究。E-mail: 673061484@qq.com。

通信作者: 张兴昌(1965—), 男, 陕西武功人, 研究员, 主要从事生态系统元素循环方面的研究。E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn。

bles. Additionally, the spatial auto-correlation of *Artemisia sacrorum* Ledeb was greater than that of *Medicago sativa*. The results from this study suggested that the spatial auto correlation and dependence of grass biomass and nutrients contents became increased with the succession of artificial grass community to natural community.

Keywords: cropping-pastoral ecotone; abandoned grassland; nutrients content; spatial distribution

黄土高原农牧交错带不但是我国北方草地向农地利用的过渡地带,也是剧烈水蚀风蚀地带和黄土高原生态环境最为脆弱地带,在黄土高原生态屏障的维护和区域国土治理中有着重要的作用和地位^[1-3]。该区在长期的开垦和放牧活动影响下,草地退化、水土流失和土地沙化现象严重,生态环境遭到极大破坏^[4]。近年来在黄土高原农牧交错带实施的退耕还草措施对受损生态系统起到了重要的修复作用,人工草地和天然草地面积大幅增加,水土流失得到了显著遏制^[5]。目前我国学者针对退耕地土壤和植物养分状况开展了大量研究^[6-8],但是关于退耕地群落养分在空间分布方面的研究较少,而对这方面的认识可为理解退耕草地的生物地球化学循环过程和退耕草地的演替过程提供科学依据^[9],对退耕草地的管理和利用也具有重要意义。

研究生态系统属性特别是养分含量的空间分布,不仅能为生态系统资源的有效性和空间格局提供判定,而且可以为生态系统中植物群落的演替提供指导依据^[10]。目前人们已对草地、农田和森林生态系统土壤植物养分的空间分布特征开展了大量研究,如张国平等对紫色土丘陵区农田土壤空间分布的研究结果表明,土壤有机质和碱解氮含量与地形因子之间的相关性较强,有效磷和速效钾含量与地形因子之间的相关性较弱^[11];王激清等对冀西北农牧交错带土壤养分空间分布的研究发现人类活动增强了土壤养分时空变异性^[12];余新晓等对森林土壤养分分布的研究结果表明,森林土壤全 N、全 P 和碱解 N 的空间变异性与植被类型有关^[13]。这些研究为认识特定生态系统养分分布规律奠定了重要基础,但很少有研究将养分空间分布与群落演替联系起来。

在农牧交错带坡地养分空间分布方面,王辽宏等的研究表明本氏针茅坡地土壤-植物系统磷在不同空间尺度上空间结构比较稳定,其空间变异主要来源于结构性因素^[14];Wei 等的研究表明,草坡地种植柠条增大了土壤资源的空间分布异质性,而且这种影响与土壤类型有关^[15]。这些研究的对象都为黄土高原农牧交错带天然草地的顶级群落本氏针茅,而且仅限于土壤中的养分和植物中的 P,对于人工草地向天然草地过渡的群落和植物中

养分,特别是 N 和 K 的关注较少。退耕苜蓿坡地群落演替为苜蓿-铁杆蒿-长芒草的次序,苜蓿-铁杆蒿群落是人工草地演替的主要过程^[16]。此外,农牧交错带草地生态系统受 N 限制^[17],草坡地植物 N 空间分布在草地群落生产力和演替方向与速度方面具有决定性作用,需要开展深入的研究。

本研究以黄土高原农牧交错带退耕坡地苜蓿-铁杆蒿群落为对象,运用经典统计学分析方法和地统计学方法,研究了苜蓿-铁杆蒿群落植物生物量和养分含量的空间分布特征及其空间结构特征,旨在为农牧交错带退耕草地群落养分管理和群落演替过程判定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

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,该试验站位于神木县以西 14 km 的六道沟小流域,北依长城,地处毛乌素沙漠边缘,是黄土高原向毛乌苏沙漠、森林草原向典型干旱草原的过渡地带,也属于西部大开发“退耕还林还草区”,为典型的农牧交错带。由于长期受人为耕作的干扰,该区草地开垦严重,生态环境极其脆弱。流域面积 6.89 km²,年平均气温 8.4℃,降水量 437 mm,其中 77% 发生在 6—9 月份,属于中温带半干旱气候类型。植被类型为干旱草原,天然植被大部分遭到严重破坏,残存的天然草场也已退化、沙化。该区地貌类型为片沙覆盖的黄土丘陵,坡地占整个流域的 76.5%,地带性土壤为黑垆土,由于长期强烈侵蚀,已被绵黄土、新黄土、红土以及在沙地上发育起来的风沙土、坝地土所取代。研究区目前草地多为退耕草地上自然演替发育的群落。

1.2 样品采集及分析

本研究以六道沟小流域一退耕 20 年草坡地为研究对象,该坡地长 200 m,坡度 10°左右。该坡地退耕后种植苜蓿,经过 20 年自然演替,目前优势物种主要为苜蓿-铁杆蒿群落。于 2007 年 8 月,沿坡地自上而下间隔 10 m 设置一个样带,共设 20 个样带。每个样带内设生长均匀的 2 个样点,采集 1 m × 1 m 样方地上部群落生物量,并将苜蓿与铁杆蒿进行分类,带回实验室,经 105℃ 杀青半小时,70℃

烘干 24 h 后, 称干重。

植物样经烘干粉碎后过 0.5 mm 筛, 测定养分 N、P、K 含量。植物 N 含量用凯氏定氮法测定, P 含量用钼蓝黄比色法测定, K 含量用火焰光度法测定。

1.3 数据处理

本研究所有数据的基本统计分析采用 Microsoft Excel 2003 软件进行, 方差分析和相关性分析采用 SPSS 18.0 软件进行, 半方差函数分析及有关参数的计算、空间自相关分析均采用地统计软件 GS +9.0 进行。

2 结果与分析

2.1 退耕坡地苜蓿 - 铁杆蒿群落植物生物量和养分分布特征

苜蓿 - 铁杆蒿群落地上生物量以坡底部最高, 坡中部和坡上部相似 ($P < 0.05$); 生物量的变异系数以坡底部最小, 这与坡下部对资源的富集有关。研究区退耕坡地苜蓿 - 铁杆蒿群落各个植物生物量和养分含量也与坡位有关(表 1)。苜蓿生物量在坡中部最小, 坡上部最大 ($P < 0.05$); 铁杆蒿的生物量则随着坡位降低显著增加 ($P < 0.05$) (图 1)。苜蓿

和铁杆蒿的生物量变异系数则呈现出与此相反的趋势: 苜蓿生物量在坡中部变异最大, 铁杆蒿生物量在坡上部变异最大(表 1)。这些结果表明, 对于退耕坡地苜蓿 - 铁杆蒿群落坡地来说, 坡上部群落以苜蓿为主导物种, 坡下部以铁杆蒿为主导物种, 坡中部由二者共同主导。因此退耕人工草地下坡位向天然草地演替趋势强于上坡位, 这与植物对退耕坡地资源的利用有关。本研究中坡中部和上部苜蓿生物量较高, 对土壤水分的消耗较大, 而且苜蓿对土壤水分的利用强度大于铁杆蒿, 这就使得坡中部和上部的土壤水分状况不利于铁杆蒿的生长; 而坡下部苜蓿生物较小, 其对土壤水分的消耗较弱, 加之坡下部的汇水作用, 铁杆蒿的生长优于坡上部和中部。此外, 由于坡面水土过程对土壤养分的再分布作用, 侵蚀环境下的退耕坡地上部土壤较为贫瘠, 下部土壤养分含量较高^[18], 使得坡下部草地群落的自然演替过程加快。坡下部相对丰富的水分和养分也降低了铁杆蒿生物量和群落总生物量的变异系数, 因此退耕坡地群落演替过程是由坡位控制的资源分配驱动的过程。

表 1 退耕坡地各变量描述性统计特征
Table 1 Descriptive statistics of the variables

项目 Item	坡位 Slope position	均值 Mean		变异系数 CV/%		方差值 Variance	
		苜蓿 MS	铁杆蒿 AS	苜蓿 MS	铁杆蒿 AS	苜蓿 MS	铁杆蒿 AS
植物干重 Dry Weight (t · hm ⁻²)	整个坡面 Whole slope	0.67	0.52	29.18	55.04	0.04	0.08
	坡上 Upper slope	0.81a	0.30a	22.95	53.89	0.03	0.03
	坡中 Middle slope	0.52b	0.48a	29.43	38.35	0.02	0.03
	坡下 Lower slope	0.66ab	0.78b	21.61	34.69	0.02	0.07
氮含量 N concentration (g · kg ⁻¹)	整个坡面 Whole slope	21.13	20.30	16.92	22.78	12.78	21.37
	坡上 Upper slope	19.71a	22.70a	9.55	8.66	3.55	3.86
	坡中 Middle slope	25.53b	23.29a	7.06	8.91	3.25	4.30
	坡下 Lower slope	18.38a	15.32b	10.12	25.82	3.46	15.67
磷含量 P concentration (g · kg ⁻¹)	整个坡面 Whole slope	1.54	1.80	17.20	11.53	0.07	0.04
	坡上 Upper slope	1.44a	1.84a	10.02	11.76	0.02	0.05
	坡中 Middle slope	1.80b	1.89a	15.55	11.56	0.08	0.05
	坡下 Lower slope	1.40a	1.69a	12.39	9.74	0.03	0.03
钾含量 K concentration (g · kg ⁻¹)	整个坡面 Whole slope	6.56	16.93	34.01	23.95	4.97	16.44
	坡上 Upper slope	6.99a	20.26a	20.33	10.35	2.02	4.39
	坡中 Middle slope	8.44a	18.3a	19.42	7.55	2.68	1.90
	坡下 Lower slope	4.16b	12.43b	28.15	22.16	1.37	7.58

注: 均值中同一列数据后不同小写字母表示坡位间差异达 5% 水平。

Note: Values followed by different letters in a column were significantly different among slope positions at the 5% level.

退耕坡地苜蓿 - 铁杆蒿群落植物 N、P、K 养分含量也与植物种类和坡位有关(表 1)。从整体看,

苜蓿的 N、P 含量与铁杆蒿相近, 但是 K 含量远低于铁杆蒿; 而且苜蓿 N、P 含量的变异系数与铁杆蒿

相近,而 K 含量的变异系数远大于铁杆蒿(表 1)。不同坡位苜蓿 N、P、K 含量均以坡中部最高,铁杆蒿养分含量则以坡底部最低,这可能与植物对养分的稀释效应有关^[19]。本研究中苜蓿和铁杆蒿的生物量均与其养分含量负相关(表 2),因此退耕坡地苜蓿-铁杆蒿群落养分含量是由坡位主导的坡面水土过程引起的坡面水土资源分配和草地自然演替中生物量分配所决定的。

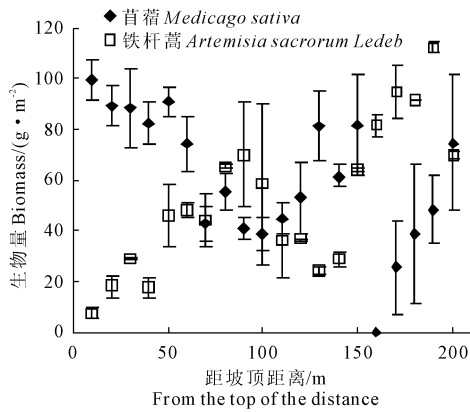


图 1 苜蓿-铁杆蒿生物量随坡位的变化

Fig. 1 The changes in biomass along slope position

2.2 退耕坡地苜蓿-铁杆蒿群落植物生物量和养分空间结构特征

为了分析退耕坡地苜蓿-铁杆蒿群落生物量和养分含量空间分布的结构性和随机性,用地统计学方法分析了这些变量的变异函数(表 3)。苜蓿生物

量和 N 含量的最优模型为球状模型,而铁杆蒿生物量和 N 含量的最优模型为高斯模型,表明退耕坡地苜蓿-铁杆蒿群落同一植物的生物量和 N 含量具有相似的空间结构,但是这种空间结构因植物种类不同而异,这可能与研究区生态系统养分有效性有关。黄土高原农牧交错带草地生态系统主要受 N 限制^[17],苜蓿自身具有固 N 功能,可以解除 N 限制,其体内 N 含量较高,生物量也较高(表 1),并且表现出相似的空间分布特征;铁杆蒿不具有固 N 功能,生长主要受 N 限制,其生物量和 N 含量较低,表现出相似的,并且不同于苜蓿的空间分布特征(表 2)。

表 2 各变量之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients among variables

变量 Variable	氮含量 N concentration	磷含量 P concentration	钾含量 K concentration
生物量 Biomass	-0.806**	-0.422	-0.843**
铁杆蒿 AS	氮含量 N concentration	1	0.526*
	磷含量 P concentration		1
	生物量 Biomass	-0.533*	-0.377
苜蓿 MS	氮含量 N concentra- tion	1	0.636**
	磷含量 concentration		1
			0.540*

注(Note): ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$.

表 3 各变量半方差理论及模型参数

Table 3 Semi-variogram function and parameters for the variables

变量 Variable	模型 Model	块金常数 Nugget	基台值 Sill	块金效应 Ratio of nugget to sill	变程/m Range
苜蓿干重 MS Biomass	S	0.004	0.045	8.628	60.60
苜蓿氮含量 MS N concentration	S	0.010	12.320	0.081	55.20
苜蓿磷含量 MS P concentration	S	0.000	0.063	0.315	18.40
苜蓿钾含量 MS K concentration	G	1.070	6.240	17.147	64.25
铁杆蒿干重 AS Biomass	G	0.017	1.638	1.038	711.70
铁杆蒿氮含量 AS N concentration	G	7.200	74.400	9.677	267.60
铁杆蒿磷含量 AS P concentration	S	0.003	0.045	7.623	21.70
铁杆蒿钾含量 AS K concentration	G	2.700	66.400	4.066	268.12

注(Note): G - 高斯模型 Gaussian model; S - 球状模型 Spherical model.

本研究中苜蓿和铁杆蒿 P 含量均以球状模型最佳;尽管铁杆蒿中 K 含量几乎是苜蓿含量的 3 倍,但两种植物中 K 含量的空间分布均以高斯模型最佳(表 2),表明该群落 P、K 含量的空间结构特征不受植物种类的影响,也表明植物对 P、K 养分的吸收主要取决于土壤 P、K 养分的有效性,这与研究区

草地生态系统受 N 限制而不受 P、K 限制有关。苜蓿和铁杆蒿植物生物量和养分含量沿坡面的空间结构特征表明,退耕坡地自然演替过程中,群落生物量和群落养分含量的空间分布特征与群落组成有关,并且会在群落演替过程中发生变化;对于生物量和植物体 N 含量(生态系统的养分)来说,其空间分布

特征与植物种类有关;对于植物体其它养分含量来说,其空间分布主要受养分资源空间分布的影响,与植物种类关系不大。这与王辽宏对研究区退耕长芒草坡地 P 空间分布的研究结果一致^[14]。

空间结构模型中块金常数表征变量的随机性误差,基台值表征结构性误差;块金效应 < 25% ,表明变量具有强烈的空间相关性,变异主要由结构因子造成;块金效应介于 25% ~ 75% 之间,表明变量具有中等空间自相关性;块金效应 > 75% ,表明变量的空间自相关性微弱,变异主要由随机因子组成。本研究苜蓿生物量和养分的块金常数均小于铁杆蒿,苜蓿生物量和 N、K 含量的基台值也小于铁杆蒿,而苜蓿生物量和 K 含量的块金效应均大于铁杆蒿,N、P 含量的块金效应则小于铁杆蒿(表 3),表明苜蓿 - 铁杆蒿群落生物量和养分含量空间分布的结构性与群落组成有关。本研究中所有变量块金效应都小于 25% ,表明这些变量具有较强的空间依赖性,而且这些变量的空间变异主要由结构性因素决定,这与王辽宏对研究区退耕本氏针茅草坡地生物量和 P 分布的研究结果一致^[14],因此研究区退耕坡地苜蓿 - 铁杆蒿群落生物量和养分的空间分布是由坡地水土过程和群落演替过程等因素决定的,而且随着人工草地向天然草地的演替,群落空间分布的结构性逐渐增强。

变程是指空间变量的变异函数达到基台值所对应的距离,表征变量空间自相关范围的大小。在变程范围之内,变量具有空间自相关性,而且变程越大,空间依赖性越强,结构性也越好。本研究中苜蓿 - 铁杆蒿群落各物种生物量和 N、K 含量的变程远远大于 P 含量的变程,而且苜蓿生物量和养分含量的变程均小于铁杆蒿,表明铁杆蒿生物量和养分含量的空间结构性优于苜蓿。尽管研究区退耕草地植物 N、K 含量的空间分布未见报道,但本研究中苜蓿和铁杆蒿 P 含量的变程分别为 18 m 和 22 m,小于王辽宏等报道的研究区退耕长芒草坡地植物 P 含量的变程(45 m)^[14],表明在退耕坡地,沿着研究区常见的苜蓿 - 铁杆蒿 - 长芒草演替序列,植物养分含量空间分布自相关范围逐渐增大,其空间依赖性逐渐增强,这也说明坡地退耕后随着人工草地向天然草地的演替,群落养分含量的空间结构性逐渐增强,因此本研究也从群落养分空间分布方面提供了人工草地向天然草地演替过程中其结构性增强的证据。

2.3 退耕坡地苜蓿 - 铁杆蒿群落植物生物量和养分空间自相关特征

本研究中 K 含量的自相关指数(Morans' I)最

高,P 含量的自相关系数最低,而且铁杆蒿各变量的自相关系数均高于苜蓿(图 2)。苜蓿和铁杆蒿各变量自相关性随距离变化表现出相似的趋势,但随变量的不同而异(图 3),如生物量和 N 含量的空间自相关性随距离增加逐渐减弱,之后又逐渐增强,这与生物量和 N 含量表现出相同的空间结构性有关;P 含量自相关系数始终在 0 附近波动,而 K 含量的自相关性随距离变长逐渐减弱。此外,不同距离处铁杆蒿各变量的自相关性大于苜蓿,表明随着人工草地向天然草地的演替,群落生物量和养分含量的空间自相关性和依赖性逐渐增强。

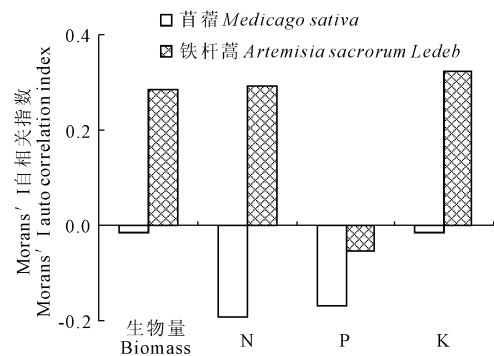


图 2 各变量自相关系数

Fig. 2 The Moran's I of the variables in the grass slope

3 结 论

1) 黄土高原农牧交错带退耕坡地苜蓿 - 铁杆蒿群落生物量和养分含量与坡位和植物种类有关,苜蓿生物量在坡中部最小,坡上部最大;铁杆蒿的生物量则随着坡位降低显著增加;苜蓿 N、P 含量与铁杆蒿相近,K 含量远低于铁杆蒿,而且苜蓿养分含量均以坡中部最高,铁杆蒿则以坡底部最低;表明退耕地苜蓿 - 铁杆蒿群落坡上部以苜蓿为主导物种,坡下部以铁杆蒿为主导物种,坡中部由二者共同主导。

2) 退耕坡地苜蓿 - 铁杆蒿群落同一植物的生物量和 N 含量具有相似的空间结构,但是这种空间结构因植物种类不同而异;苜蓿和铁杆蒿 P 含量均以球状模型最佳,K 含量的空间分布均以高斯模型最佳,其空间结构特征不受植物种类的影响;苜蓿 - 铁杆蒿群落生物量和养分含量具有较强的空间依赖性,其空间变异主要由结构性因素决定。

3) 各变量中 K 含量的自相关系数最高,P 含量的自相关系数最低;苜蓿和铁杆蒿各变量自相关性随距离变化表现出相似的趋势,但随变量的不同而异,而且不同距离处铁杆蒿各变量的自相关性大于

苜蓿表明随着人工草地向天然草地的演替,群落生物量和养分含量的空间自相关性和空间依赖性逐渐增强。

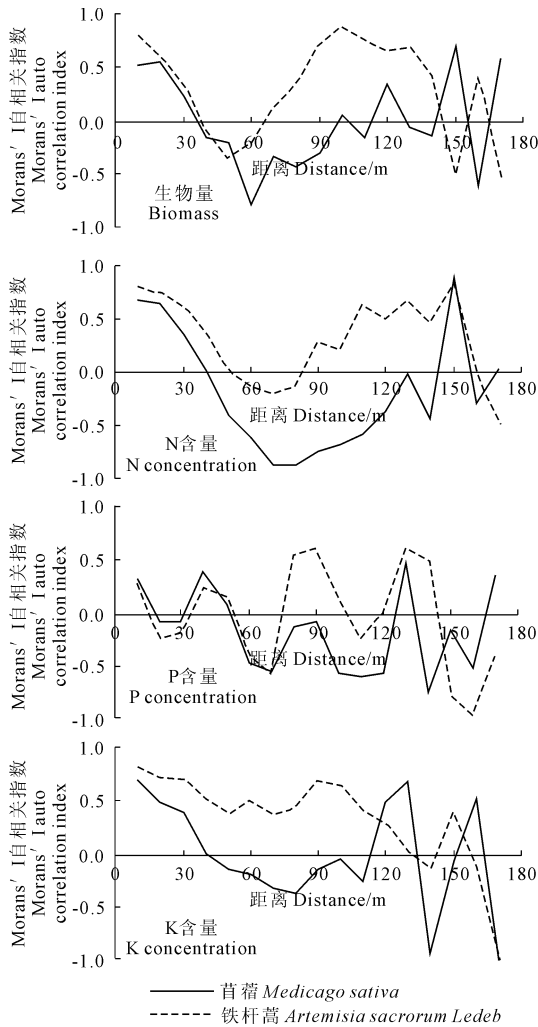


图 3 各变量空间自相关图

Fig. 3 The spatial auto-correlogram of variables along slope

参考文献:

[1] 朱桂林, 山 仑, 刘国彬. 黄土高原农牧交错带植被恢复途径 [J]. 中国水利 2004 (8): 30-32.

[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): 387-391.

[3] 朱显谟. 再论黄土高原国土整治“28 字方略” [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报 ,1995 ,1(1): 4-9.

[4] 李永红, 高照良. 黄土高原地区水土流失的特点、危害及治理 [J]. 生态经济 2011 (8): 148-153.

[5] 侯军岐, 张社梅. 黄土高原地区退耕还林还草效果评价 [J]. 水土保持通报 2002 22(6): 29-31.

[6] 王俊明, 张兴昌. 退耕草地演替过程中的碳储量变化 [J]. 草业学报 2009 ,18(1): 1-8.

[7] 潘成忠, 上官周平, 刘国彬. 黄土丘陵沟壑区退耕草地土壤质量演变 [J]. 生态学报 2006 26(3): 690-696.

[8] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响 [J]. 农业工程学报 2009 25(2): 50-55.

[9] 邱 扬, 张 英, 孟庆华. 生态退耕与植被演替的时空变异 [J]. 生态学杂志 2008 27(11): 2002-2009.

[10] 李昌龙, 肖 斌, 王多泽, 等. 石羊河下游盐渍化弃耕地植被演替与土壤养分相关性分析 [J]. 生态学杂志 2011 30(2): 241-247.

[11] 张国平, 郭澎涛, 刘洪斌, 等. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测 [J]. 农业工程学报 2013 29(6): 113-120.

[12] 王淑清, 张宝悦. 冀西北农牧交错带土壤养分时空变异与生产特性研究 [J]. 干旱区资源与环境 2013 28(3): 86-90.

[13] 余新晓, 张振明, 朱建刚. 八达岭森林土壤养分空间变异性研究 [J]. 土壤学报 2009 46(5): 959-964.

[14] 王辽宏, 邱莉萍, 张兴昌, 等. 农牧交错带本氏针茅坡地土壤-植物系统磷素分布特征 [J]. 植物营养与肥料学报 2013 , 19(5): 1192-1199.

[15] Wei X , Huang M , Shao M , et al. Shrubs increase soil resources heterogeneity along semiarid grass slopes in the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Environments ,2013 88: 175-183.

[16] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原原草植被建设的地带性特征 [J]. 植物生态学报 2002 26(3): 339-345.

[17] Wei X , Shao M , Fu X , et al. The effects of land use on soil N mineralization during the growing season on the northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma ,2011 ,160: 590-598.

[18] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征 [J]. 生态学报 2007 27(2): 603-612.

[19] 阴黎明, 王力华, 刘 波. 文冠果叶片养分元素含量的动态变化及再吸收特性 [J]. 植物研究 2009 29(6): 685-691.