

艾比湖流域土壤有机质垂直空间变异特征

张辉国¹, 王合玲^{2,3}

(1. 新疆大学 数学与系统科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆财经大学 应用数学学院, 乌鲁木齐 830012; 3. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:利用沿土壤深度方向的垂直滞后空间相关系数和经验正交函数分解方法研究了新疆艾比湖流域土壤有机质含量的垂直空间分布结构。结果表明:垂直滞后空间相关系数和经验正交函数分解方法能够有效分析空间区域土壤有机质垂直分布的相关性和空间异质性;垂直滞后空间正相关或负相关的集聚区域指示了相似或相反的有机质垂直分布模式,并且土壤有机质含量相关性随土层深度间隔增大而衰减;流域不同区域土壤有机质沿土层深度的垂直分布呈现分异特征,流域东部和西部地区有机质含量随土层深度增加而升高,但中部区域有机质含量随土层加深而降低,而且土壤有机质含量沿垂直方向递增或递减的速率在流域内亦表现出空间异质性。

关键词:土壤有机质; 滞后空间相关系数; 垂直空间分布; 经验正交函数分解; 艾比湖流域

中图分类号: S153.6⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)05-0077-05

Characteristics of the Vertical Distribution and Spatial Variability of Soil Organic Matter in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China

ZHANG Hui-guo¹, WANG He-ling^{2,3}

(1. School of Mathematics and System Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. School of Applied Mathematics, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China;

3. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: The vertical space distribution patterns of soil organic matter (SOM) in Ebinur Lake Basin were investigated by using the vertical-lag spatial correlation and empirical orthogonal function analysis (EOF). The results show that the vertical-lag spatial positive correlation (negative correlation) can indicate the regions where SOM has a similar (contrary) vertical distribution pattern. Specifically, the SOM content displays an increasing trend with increase of soil depth in the eastern and western regions of Ebinur Lake Basin, but the SOM content decreases with the increase of soil depth in the central part of the basin. The SOM content within the 40 cm interval of soil layers is strong correlation, but it is a weak correlation when the interval of soil layer is more than 40 cm. There is a threshold along the vertical direction of soil (i. e. 60 cm) where the SOM content increment (decrement) rate is very different. In Ebinur Lake Basin, the vertical spatial variability of SOM was severely affected by the spatial variation of the watershed ecological environment, ecological landscape, the rhizodeposition characteristics of arid vegetation and the spatial heterogeneity of soil profile evolution.

Key words: soil organic matter (SOM); lag spatial correlation; vertical space distribution; empirical orthogonal function analysis (EOF); Ebinur Lake Basin

土壤有机质(SOM)是表征土壤肥力和土壤质量的重要因子,在土地荒漠化、草场退化和区域生态恶化等环境问题中扮演着重要角色^[1-2]。土壤有机质的空间分布特征及各种影响因素在国内外被广泛研

究^[3-7],用以揭示土壤有机质分布对水平空间的依赖性^[8-10],但针对 SOM 沿土壤剖面深度(即垂直方向)空间变异性和相应分析方法的研究较少^[11-13]。探究土壤要素垂直分布相关性和变异性的统计分析方法

和土壤有机质垂直空间分布特征对于土壤质量评价、土壤侵蚀防治、植被根际沉积(rhizodeposition)及土壤剖面发育和演化等具有重要意义。鉴于垂直滞后空间相关系数^[14](vertical-lag spatial correlation)和经验正交函数分解方法(empirical orthogonal function analysis, EOF)在分析空间数据垂直结构方面的有效性,本文利用该方法研究新疆艾比湖流域尺度上土壤有机质含量的垂直空间变异特征,为干旱区湖泊流域土壤资源的合理利用、可持续发展以及植被恢复提供决策依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

艾比湖流域位于中国新疆西北部(43°38′—45°52′N,79°53′—85°02′E),包括塔城地区的乌苏和托里县南部,博尔塔拉蒙古自治州的博乐市、温泉县和精河县,伊犁州直属的奎屯市和克拉玛依市的独山子区,东西长约 300 km,南北宽约 160 km,全流域面积 5 万 km²。此封闭性流域地处欧亚大陆腹地,远离海洋,三面环山,降水稀少,气候干燥,沙尘、盐尘天气频发,属典型温带干旱大陆气候区^[15-16],位于其核心区域的艾比湖是准格尔盆地西南部地势最为低洼的水、盐汇集中心,主要地貌为湖泊沼泽、低山丘陵、冲洪积平原和湖积平原等,主要土壤类型包括沼泽土、泥炭土、草甸土、沼泽盐土、草甸盐土、风沙土和灰漠土等。

20 世纪中后期,艾比湖湿地自然保护区受新疆气候环境演变影响,年降水量呈减少趋势,气候愈加干燥,土地沙化、盐渍化程度加剧。气候环境恶化导致植被衰退并且制约艾比湖湿地植物群落演替,该区域植物建群种主要演化为旱生、超旱生、沙生和盐生植物,主要植物种类包括胡杨(*Populus euphratica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、芦苇(*Phragmites australis*)和小獐茅(*Aeluropus pungens*)等。

1.2 土壤样品测定

为了系统研究艾比湖流域内土壤有机质沿土壤深度方向的垂直空间分布特征,依据流域内典型土壤质地(砂土、壤土、黏壤土和黏土)以及主要植物群系(胡杨群落、梭梭群落、怪柳群落、盐生灌木林、草甸和荒原)的分布特点,2009 年沿精河、博尔塔拉河和奎屯河等主要入湖河系以及艾比湖湿地布设 45 个土壤剖面发育完整、层次清晰和无入侵体的采样点,共采

集 270 个土壤样品。此外,为了降低人为因素干扰,样点避开耕地且与公路和铁路的距离大于 300 m。每个样点土壤剖面按自下而上分层次采样,以确保不同深度土壤样品无相互混杂污染,采样总深度为 120 cm,每 20 cm 土壤作为一个取样层,共计 6 个土壤层,且每层土壤样品不少于 2.5 kg。土壤样品经风干、研磨和过 100 目筛(0.15 mm 孔径)后备用,利用重铬酸钾—硫酸溶液直接加热消解法测定土壤有机质含量。

1.3 分析方法

本文以探索土壤有机质在流域内垂直空间分布异质性为研究重点,首先利用沿土层深度方向的垂直滞后空间相关系数分析新疆艾比湖流域土壤有机质含量对垂直空间的依赖性;然后运用经验正交函数分解方法分析有机质在土壤剖面不同深度垂直分布的变异特征。数据使用 Matlab 软件分析处理,地图使用 Surfer 软件绘制。

所有土壤采样点在不同土层深度有机质含量数据的协方差和相关系数能够充分测度有机质含量分布对垂直空间的依赖性。设采样点 $s_i (i=1, 2, \dots, n)$ 在土层深度水平 $d (d=1, 2, \dots, D)$ 的 SOM 含量记为向量:

$$Y_d = [Y(s_1; d), \dots, Y(s_n; d)]^T, \quad d=1, 2, \dots, D \quad (1)$$

沿土层深度方向, m —阶垂直滞后空间协方差矩阵定义为:

$$C^{(m)} = \frac{1}{D-m} \sum_{d=m+1}^D (Y_d - \mu)(Y_{d-m} - \mu)^T, \quad m=0, 1, \dots, D-1 \quad (2)$$

其中 μ 为沿土层深度方向的垂直空间均值向量,其定义为:

$$\mu = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D Y_d \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)得到沿土层深度方向 m —阶垂直滞后空间相关系数为:

$$\rho^{(m)} = \Lambda^{-\frac{1}{2}} C^{(m)} \Lambda^{-\frac{1}{2}}, \quad m=0, 1, \dots, D-1 \quad (4)$$

其中 $\Lambda = \text{diag}[C^{(0)}]$ 是 0—阶滞后空间协方差矩阵的主对角矩阵,其每个元素是对应采样点沿土层深度(垂直方向)SOM 含量的方差。(4)式中 m —阶垂直滞后空间相关系数 $\rho^{(m)}$ 能够提供要素场对垂直空间依赖性的全面信息^[14]。

2 结果与分析

表 1 列出了全流域及其西部、中部和东部各区域内采样点 SOM 含量均值和标准差基本统计结果。流域西部 SOM 含量从 0—20 cm 较浅土壤的 1.80

g/kg 大幅增加至 100—120 cm 较深土壤的 6.61 g/kg, 东部 SOM 含量则从 0—20 cm 浅层土壤的 1.04 g/kg 逐步增至 100—120 cm 深层土壤的 2.86 g/kg, 而流域中部 SOM 含量从 0—20 cm 浅层土壤的 2.85 g/kg 降至 100—120 cm 较深土壤的 1.51 g/kg。通

过上述有机质数据的基本统计分析,能够初步做出推断:尽管在全流域内有机质沿土层深度方向没有一致的垂直分布模式,但是在流域不同区域内部却表现出较为一致的垂直分布趋势。艾比湖流域内有机质沿土层深度方向的垂直分布呈现区域分异特点。

表 1 流域不同区域和土层深度的 SOM 平均含量

g/kg

区域	土层深度/cm						
	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	0—120
流域西部	1.80±0.71	2.51±1.58	4.16±3.35	5.25±3.51	5.75±3.02	6.61±3.50	4.22±3.05
流域中部	2.85±3.14	1.97±1.93	2.15±2.02	1.57±1.26	1.41±1.04	1.51±1.13	1.90±1.93
流域东部	1.04±0.60	1.12±0.65	1.29±0.77	1.61±0.92	1.90±1.10	2.86±1.85	1.64±1.20
全流域	2.32±2.67	1.83±1.71	2.16±2.09	1.96±1.89	1.90±1.74	2.26±2.13	2.07±2.05

2.1 土壤有机质含量的垂直空间相关性测度

根据艾比湖流域内 45 个采样点在 6 个土壤层的有机质含量数据,利用式(4)计算得到沿土层深度方向 m -阶垂直滞后空间相关系数 ($m=0, 1, 2, 3, 4, 5$),其中 0-阶、1-阶垂直滞后空间相关系数矩阵的图像见图 1。当垂直滞后阶数大于 2 时,空间相关系数绝对值普遍小于 0.3,这说明在整个流域内土壤深度间隔超过 40 cm 以后,有机质垂直空间分布水平相关性较弱,因而相应的垂直滞后空间相关系数可视化图像未在本文中讨论。

垂直滞后空间相关系数图 1 中,颜色由浅到深表示相关系数绝对值由小到大,其中深色表示该区域相关系数为负数,即负相关,浅色表示该区域为正相关,其它颜色则表示出了相关性较弱的区域。依据 0-阶垂直滞后空间相关系数图 1a 所显示的正相关区域

可知,流域西部(79.9°—82°E)、流域中部(82°—84°E)和流域东部(84°—85.1°E)三个区域内部采样点有机质含量呈现正相关,这说明沿土层深度方向有机质垂直分布变化模式分别在流域西、中和东三个区域内部是相似的。此外,图 1a 还显示西部和东部采样点之间为较强正相关,而流域中部采样点与西部、东部采样点有机质含量呈现较强负相关,由此可知有机质含量在流域西部和东部有着相似的垂直变化模式,但是流域中部区域的有机质垂直变异模式恰好与之相反。再结合表 1 中沿土层深度有机质含量变化趋势,可以得到如下结论:艾比湖流域西部和东部土壤有机质垂直变异模式相似,即随土层深度增加,有机质含量逐步增加,但在流域中部却呈现相反的变化模式,即土壤有机质含量随着土层深度增加而逐渐降低。

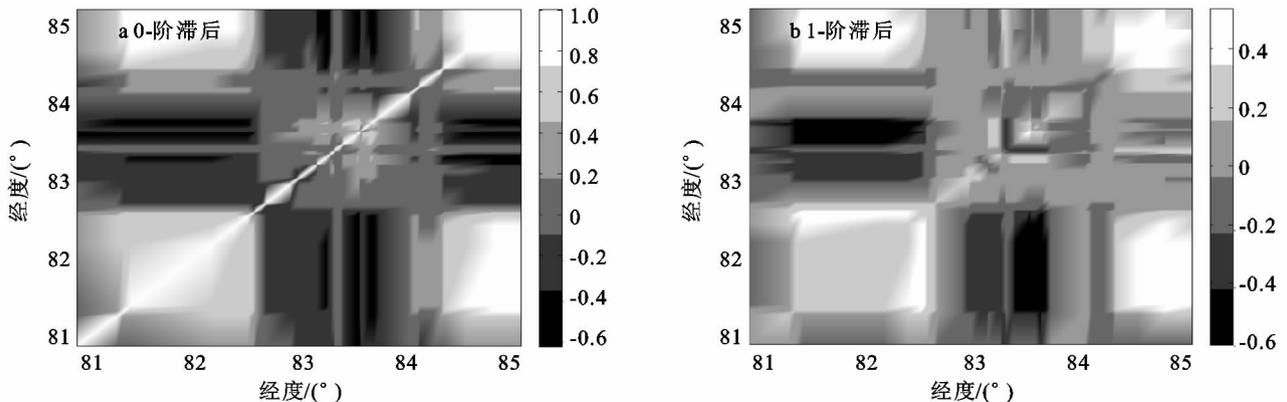


图 1 艾比湖流域沿土壤深度垂直滞后空间相关系数

图 1b 为 1-阶垂直滞后空间相关系数图,它显示了间隔为 20 cm 的各土壤层有机质含量的空间相关系数。图 1b 显示流域内浅层土壤和深层土壤有机质含量正相关区域集中于西部和东部,而流域中部与西部呈现负相关,其它区域内相关性很弱。因此,流域东部和西部区域内浅层和深层土层有机质含量相互影响比较大,而流域中部不同土壤深度有机质含量相互影响较弱。

在艾比湖流域土壤剖面成土演化过程中,中部与东、西部区域土壤有机质沿土层深度垂直积累模式呈现分异特征。艾比湖流域内靠近水源及流域中上游地带,是绿洲农业和城镇景观,而在远离水源或流域中下游地带则是破碎化的天然植被景观^[17]。土壤剖面发育、沉积和成土的长期过程主导了艾比湖流域土壤有机质垂直空间分布的分异特征。新疆艾比湖流域生态环境、生态景观的区域空间分异规律以及土壤

剖面成土演化过程的空间异质性和土壤有机质垂直空间变异特征具有显著制约。

2.2 土壤有机质空间分布垂直变异特征

经验正交函数分解方法(EOF)被广泛用于分析气象科学领域的时空数据,它使用降维技术探索要素场的时空协变结构。本节运用 EOF 方法分析艾比湖流域土壤有机质在水平空间分布模式沿垂直方向发生的变异结构特征。沿用上面土壤有机质记号,流域内 n 个采样点 D 个土层深度水平的有机质含量数据矩阵表示为 $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_D), Y_d$ 见式(1)。将有机质数据矩阵 Y 分解为水平空间函数 ϕ 和垂直空间函数 V 两部分,如式(5)所示:

$$Y = \phi V \quad (5)$$

其中水平空间函数 $\phi=(\phi_1, \dots, \phi_n)$ 是正交矩阵,每个列向量表示一个典型水平空间场,即所谓 EOF 分量。 ϕ 可通过对角化式(2)中 Y 的协方差阵 $C^{(0)}$ 得到,其满足

$$C^{(0)} = \phi \Lambda \phi^T \quad (6)$$

上式中 $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \Lambda, \lambda_n)$, 且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \Lambda \geq \lambda_n$ 分别是 $C^{(0)}$ 的特征值。进一步计算 Y 在 ϕ 的投影可得到垂直空间函数 $V = \phi^T Y$, 它是典型水平空间场的权重系数。因此不同土层深度的要素场就是若干个 EOF 分量按垂直空间函数所给定的不同权重系数的线性叠加, EOF 方法通过选取尽可能少的 EOF 分量来表示要素矩阵 Y 中尽可能多的空间结构信息。

艾比湖流域土壤有机质 EOF 分解所得 EOF 分

量的方差分析见表 2, 艾比湖流域土壤有机质数据 Y 的 90.01% 空间结构变异能够由前两个分量解释, 因此主要分析前两个分量所包含的 SOM 沿水平空间与垂直空间的分布变异特征。

表 2 EOF 展开前三个主分量的方差贡献及累积方差贡献率

主分量	标准差	方差贡献率/%	累计贡献率/%
特征向量 1	8.2103	75.68	75.68
特征向量 2	3.5729	14.33	90.01
特征向量 3	2.3043	5.96	95.97

图 2a 给出了艾比湖流域有机质 EOF 分解第一模态水平空间函数分量及其对应沿土层深度方向的垂直空间函数分量, 其解释了 75.68% 的土壤有机质空间分布结构差异。第一模态水平空间函数分量的正值分布于流域东部和西部, 而负值集中分布于流域中部, 因此全流域内有有机质在水平空间分布呈现东部和西部同位相、而中部区域反向变化的特征。随土层深度增加垂直空间函数系数从 -12 增加至 10, 呈现严格线性递增趋势, 这说明艾比湖流域内沿土层深度方向有机质含量具有线性增加或降低趋势。结合水平和垂直空间函数分量的正或负取值以及垂直空间函数系数趋势性, 可以得到如下结论: 艾比湖流域有机质垂直空间分布具有分异特征, 东部和西部有机质含量随土壤深度增加而呈现线性增加趋势, 但是流域中部区域有机质含量沿土层深度方向呈现线性递减的趋势。

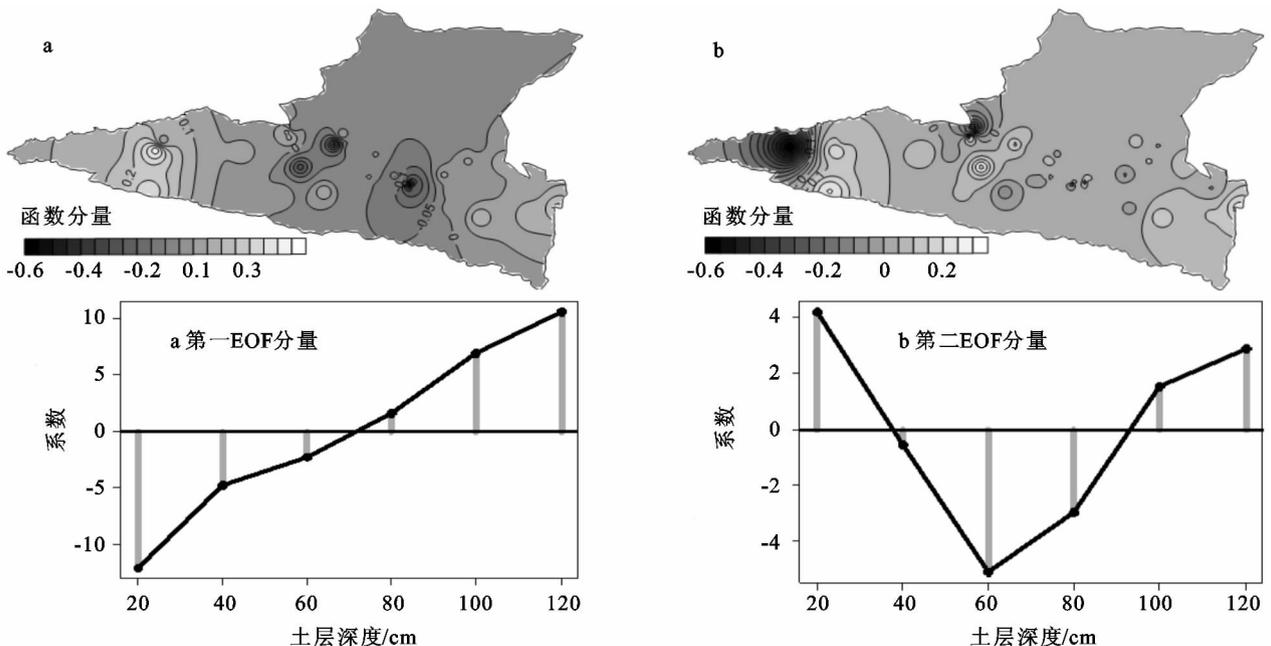


图 2 EOF 分解水平空间函数与垂直空间函数分量

艾比湖流域土壤有机质 EOF 分解第二模态水平空间函数分量及其对应沿土层深度方向垂直空间函

数分量见图 2b, 它解释了 14.33% 的土壤有机质空间分布差异。水平空间函数分量的负值集中分布于流

域西部,其它区域为非负,因而第二模态反映出有机质在水平空间分布呈现流域东部和剩余区域反向变化的特征。垂直空间函数系数在0—60 cm土壤层中线性递减,而在60—120 cm土壤层中线性递增,因此流域内有机质垂直空间分布模式以60 cm土壤深度为阈值产生分异。

艾比湖流域西部、中部和东部土层深度60cm阈值SOM增(减)量见图3,具体特点为:流域西部有机质含量递增速度在0—60 cm土壤层较快,增量达到2.36 g/kg,而在60—120 cm土壤层变慢,增量仅为1.36 g/kg;中部有机质含量沿土层深度递减速度在0—60 cm土壤层较快,减量为0.7 g/kg,而在60—120 cm土壤层减慢,减量仅有0.06 g/kg;东部有机质含量沿土层深度递增,速度在0—60 cm土壤层较慢,增量仅有0.25 g/kg,而在60—120 cm土壤层加快,增量达到1.25 g/kg。

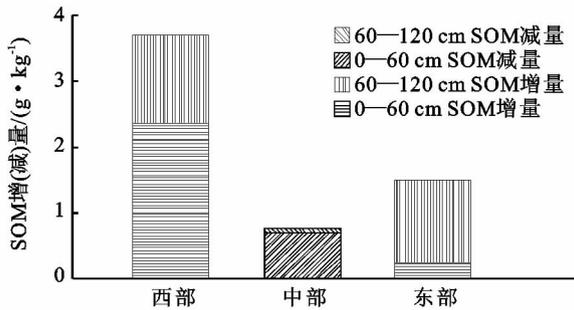


图3 艾比湖流域西部、中部和东部土层深度60 cm阈值SOM增(减)量

干旱区荒漠中的大多数植物根系主要分布在0—60 cm,而植被根长密度随着土层深度的增加而降低^[18],胡杨作为艾比湖流域的主要深根类植被,其根系主要分布在60—90 cm的土壤层,因此流域内植被根系和土壤之间的水、盐和养分等物质交换主要发生在0—60 cm土壤层^[19]。土壤有机质沿土层深度的垂直分布特征与干旱区流域内植被根际沉积特点和土壤剖面的发育过程密切相关,在长期土壤剖面发育中不断沉积和不断成土的过程导致深层土壤有机质分布呈现出与浅层土壤不同的空间变异特征。

3 结论

垂直滞后空间相关系数和经验正交函数分解方法能够有效分析空间区域土壤有机质垂直分布的相关性和空间异质性。艾比湖流域西部、东部和中部三个区域的有机质垂直滞后空间相关性特征为:在每个区域内部沿土层深度方向有机质含量都正相关,具有相似的垂直分布模式,而在流域中部与东、西部区域之间负相关,因而流域中部具有与西部和东部相反的

有机质垂直分布模式,并且土壤有机质含量相关性随土层深度间隔增大而衰减,土层深度间隔小于40 cm土壤层之间的有机质含量相关性较强,而超过40 cm土壤层间有机质含量相关性很弱。

艾比湖流域土壤有机质含量沿垂直方向含量及其变化速率在流域内亦表现出空间异质性,东部和西部有机质含量随土层深度增加而呈现线性增加趋势,但是流域中部区域有机质含量沿土层深度方向呈现递减趋势。有机质含量沿垂直方向增加或减少速率的空间分异特征为:有机质递增或递减以60 cm土层深度为阈值产生分异,流域西部和中部有机质含量在0—60 cm土层沿垂直方向递增及递减速度均较快,而在60—120 cm土壤层相应的变化速率减慢;东部有机质含量沿土层深度递增速度在0—60 cm土壤层较慢,而在60—120 cm土壤层加快。

新疆艾比湖流域生态环境、生态景观的区域空间分异规律、干旱区流域内植被根际沉积特点以及土壤剖面成土演化过程的空间异质性对土壤有机质垂直空间变异特征具有显著制约。土壤剖面发育、沉积和成土的长期过程主导了艾比湖流域土壤有机质垂直空间分布的分异特征。

参考文献:

- [1] 张芸,杨振京,孔昭宸,等.新疆石河子草滩湖湿地沉积物地球化学特征及其古环境分析[J].地理科学,2012,32(5):616-620.
- [2] 李婷,张世熔,刘浔,等.沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J].土壤学报,2011,48(4):863-868.
- [3] 腊贵晓,顾怀胜,刘国顺,等.喀斯特地区烟田土壤养分的空间变异特征[J].水土保持研究,2012,19(3):48-53.
- [4] 郭泉水,康义,赵玉娟,等.三峡库区消落带土壤氮磷钾、pH值和有机质变化[J].林业科学,2012,48(3):7-10.
- [5] 方睿红,常庆瑞.关中平原台塬区土壤养分空间格局研究:以西安市长安区为例[J].水土保持研究,2011,18(6):141-145.
- [6] 苏建红,朱新萍,王新军,等.长期围栏封育对亚高山草原土壤有机碳空间变异的影响[J].干旱区研究,2012,29(6):997-1002.
- [7] 武红旗,谷海斌,陈冰,等.土地开发对农田土壤养分和盐分变异特征的影响[J].土壤,2012,44(1):90-94.
- [8] 张忠启,于法展,李保杰,等.江苏北部县域土壤有机质空间变异特征[J].水土保持研究,2012,19(5):219-222.
- [9] 杨海峰,钱亦兵,蒋超,等.古尔班通古特沙漠南缘主要土壤化学特征的空间异质性[J].中国沙漠,2010,30(2):319-325.

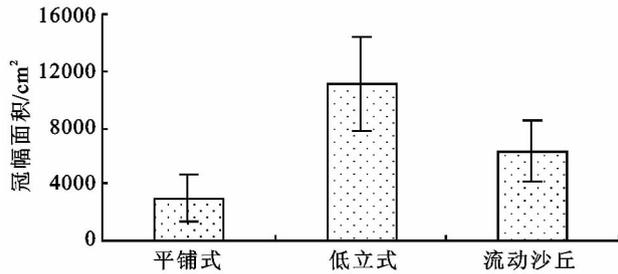


图6 平铺式和低立式沙柳沙障水冲植柳冠幅面积比较

4 结论与建议

(1) 在两种铺设方式沙障内水冲植柳长势存在一定的差异,水冲植柳的长势规律为低立式沙柳沙障 > 流动沙丘 > 平铺式沙柳沙障。经方差分析表明,两种沙障内除成活率和总枝数差异不显著外其他4项生长指标差异均极显著,其显著水平平均达到了0.01;

(2) 两种沙障内,低立式沙柳沙障水冲植柳6项生长指标值均达到了最大,平铺式沙柳沙障水冲植柳6项生长指标值最小,其中成活率最值比为1.4:1,总枝数最值比为1.5:1,株高最值比为1.5:1,新枝枝长最值比为1.7:1,新枝枝条直径最值比为1.6:1,冠幅面积最值比为3.7:1。

由于平铺式沙柳沙障的疏透度小,导致障格内积沙严重,从而影响了沙柳的正常生长,致使平铺式沙柳沙障内沙柳的长势较低立式沙柳沙障和流动沙丘的差。建议在今后的研究中应考虑沙障疏透度对沙柳长势的影响;铺设沙障时要根据立地条件对铺设方式、沙障材料及配置类型进行综合选择。从保持水土,提高造林成活率这一角度出发,建议在库布齐沙区铺设带状沙柳沙障来提高造林成效。

参考文献:

[1] 李志洪,郭建斌,张宾宾,等. 环保型土壤改良剂对沙区

(上接第81页)

[10] 赵明松,张甘霖,王德彩,等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. 土壤学报,2013,50(1):1-11.

[11] 王合玲,张辉国,秦璐,等. 新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素[J]. 生态学报,2012,32(16):4969-4980.

[12] 李宝富,熊黑钢,龙桃,等. 田块尺度下冻融前后土壤剖面盐分空间变异性研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):140-144.

[13] 阿布都热合曼·哈力克. 新疆岳普湖县土壤盐分空间变异及其分布特征研究[J]. 水土保持研究,2011,18(1):97-100.

[14] Cressie N A C, Wikle C K. Statistics for Spatio-temporal Data[M]. New York: Wiley,2011:249-252.

植物叶绿素和光合速率的影响[J]. 水土保持研究,2012,19(4):182-186.

[2] 冯起. 沙地水分的研究进展[J]. 中国沙漠,1993,13(2):9-13.

[3] 范杰英,郭军战,彭少兵. 10个树种光合和蒸腾性能对水分胁迫的响应[J]. 西北林学院学报,2005,20(2):36-38.

[4] 刘朝霞,李钢铁,李玉灵. 用聚类分析法进行毛乌素风蚀荒漠化强度分级[J]. 内蒙古林学院学报:自然科学版,1996,18(1):27-33.

[5] 阎德仁,安晓亮,任建民,等. 库布齐沙漠东缘沙物质特征的研究[J]. 内蒙古林业科技,2003(2):42-44.

[6] 安保,白永祥,田志. 沙柳生物学特性与造林技术研究[J]. 内蒙古林业科技,2003(S1):24-26.

[7] 刘永安,骆晓铭,魏建国,等. 不同水分条件下麻疯树幼苗的光合生理适应性研究[J]. 林业科学研究,2010,23(1):108-113.

[8] 周丹丹,胡生荣,韩敏,等. 沙柳沙障内植被恢复影响因子探究[J]. 水土保持研究,2008,15(6):115-118.

[9] 崔国发. 固沙林水分平衡与植被建设可适度探讨[J]. 北京林业大学学报,1998,20(6):12-14.

[10] 刘发民,张英华,何彦卿. 黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J]. 干旱区研究,2002,19(1):27-31.

[11] 李钢铁,秦富仓,贾守义,等. 旱生灌木生物量预测模型的研究[J]. 内蒙古林学院学报:自然科学版,1998,20(2):25-31.

[12] 米志英,高永,弓彩霞,等. 库布齐沙漠沙柳林复壮更新技术措施研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(6):186-189.

[13] 迟悦春,于忠芳,刘永斌. 鄂尔多斯地区沙柳生长状况分析[J]. 内蒙古林业科技,2007,33(2):17-19.

[14] 董建林,邹受益,邹立杰. 内蒙古自治区沙尘暴的分布特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(5):67-72.

[15] 王勇辉,海米提·依米提,胡江玲,等. 干旱区湿地土壤有机质空间分布及关系研究:以艾比湖湿地为例[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(11):98-103.

[16] 靳建辉,李志忠,凌智永,等. 新疆伊犁河谷新垦绿洲土壤盐渍化空间特征分析[J]. 土壤通报,2011,42(5):1057-1063.

[17] 李新琪,金海龙. 基于CBERS-2遥感数据的艾比湖流域景观生态分类系统[J]. 干旱区地理,2007,30(5):736-741.

[18] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes[J]. Oecologia,1996,108(3):389-411.

[19] 杨晓东,吕光辉. 新疆艾比湖湿地自然保护区胡杨根系水分再分配的估算[J]. 植物生态学报,2011,35(8):816-824.