

# 博尔塔拉河流域土壤有机碳的空间结构分析

帕里达·马给拉<sup>1,2</sup>, 张登清<sup>2</sup>, 吉力力·阿不都外力<sup>2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**利用描述性统计分析和地统计分析,对博尔塔拉河流域 0—20 cm 深度土壤有机碳的空间分布特征进行了研究。结果表明:博尔塔拉河流域土壤有机碳符合正态分布;半方差函数分析表明,博河上部和下部有机碳较好地符合高斯模型分布,中部有机碳符合线性模型分布。块金值与基台值的比值表明博河上部土壤有机碳含量的空间相关性很弱,说明随机性因素(如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动)引起的空间变异起主要作用;中部和下部土壤有机碳含量表现为中等空间相关性,表明结构性(如气候、母质、地形、土壤类型、自然因素等)因素和随机因素共同起作用。Kriging 插值表明:(1)博尔塔拉河流域土壤有机碳的空间分布特征主要以斑块状为主,基本与耕地分布相吻合;(2)全流域最大值出现在下游,可能与耕作模式以及河流从上游携带大量营养物质,通过灌溉在下游土壤沉淀累积有关;(3)博尔市周边土壤有机碳含量最低,这可能主要与博尔市周围为城市和工业用地有关。

**关键词:**博尔塔拉河流域;土壤有机碳;地统计分析;空间分布

中图分类号:S153.6<sup>+</sup>21

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)01-0100-05

## Spatial Structure Analysis of Soil Organic Carbon in Bortala River Basin

Palida · Mageila<sup>1,2</sup>, ZHANG Dengqing<sup>2</sup>, Jilili · Abuduwaili<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Using statistical analysis and geostatistical analysis, spatial distribution of soil organic carbon in depth of 0—20 cm in the Bortala River Basin was investigated. The results showed that the semivariance analysis indicated that soil organic carbon change process had obvious size difference. Organic carbon distribution in the upper and lower reaches of Bortala River Basin can be well described by Gaussian model, and the organic carbon distribution in the middle reaches can be fitted by the linear model. The ratio of nugget value and base value indicates that the spatial correlation of soil organic carbon content in the Bo River upper is very weak, the random factors (such as fertilization, tillage, cropping systems and other human activities cause spatial variability) play the major role; soil organic carbon contents in the middle and lower reaches exhibited moderate spatial correlation, indicating that structural factors (such as climate, parent material, topography, soil type, natural factors) and random factors play the roles. The Kriging interpolation showed that: (1) the spatial distribution characteristics of soil organic carbon present as the plaque in Bortala River Valley, which is consistent with the distribution of cultivated land; (2) the maximum value of the whole basin appeared in the downstream because of the cultivation mode and large amounts of nutrients moved from the upstream of river, soil deposition in the lower reaches due to irrigation; (3) soil organic carbon content around Bole City is the minimum, which may be related to the city and industry land around Bole.

**Keywords:** Boertala River Basin; soil organic carbon; geostatistical analysis; spatial distribution

陆地生态系统含有大量的碳,其中大部分以土壤有机质的形态储存于土壤中,即土壤有机碳。土壤是

陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量占整个陆地生态系统碳库的 2/3<sup>[1]</sup>。土壤碳库的稳定、增长或释放

收稿日期:2014-03-29

修回日期:2014-05-05

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41101190);中国科学院西部之光项目(XBBS201106)。

第一作者:帕里达·马给拉(1989—),女(哈萨克族),新疆哈密人,硕士,研究方向:气候与环境。E-mail:paridasan@126.com

通信作者:吉力力·阿不都外力(1964—),男(维吾尔族),新疆拜城县人,研究员,主要从事干旱区资源环境,生态安全和景观变化以及与俄罗斯和中亚国家的合作研究。E-mail:jilil@ms.xjb.ac.cn

都与大气碳库的变化有重要的关系,通过研究和控制土壤有机碳的转化和平衡,可以调控土壤作为大气 CO<sub>2</sub> 的源和汇<sup>[2-3]</sup>。因而土壤有机碳的分布及其转化日益成为全球有机碳循环研究的热点<sup>[4]</sup>。

目前,我国许多学者对土壤有机碳在不同的土地利用类型<sup>[5-6]</sup>、尺度<sup>[7-9]</sup>以及种植方式<sup>[10-12]</sup>下的空间分布特征作了大量研究。也有一些学者利用地统计学分析了小流域土壤有机碳的分布特征,揭示了不同地形<sup>[13]</sup>和不同侵蚀强度<sup>[14]</sup>土壤有机碳分布的差异。大多数学者都认为土壤有机碳呈随着土层深度增加而降低的趋势,不同耕作方式和农田保护措施对土壤有机碳含量分布有明显的改善作用。然而不同区域的自然条件及人类活动方式的不同,土壤有机碳的分布格局也各不相同,因此,有必要对博尔塔拉河流域土壤有机碳的分布特征进行研究。

博尔塔拉河流域是艾比湖的主要补给河流之一,该地区干旱少雨,属于典型的干旱、半干旱地区。目前,对于博尔塔拉河流域的研究主要集中在土壤物理性质、土壤盐分变化的问题<sup>[15-16]</sup>,对于土壤有机碳的研究则较少。因此,本文以博河流域为研究对象,通过资料搜集、野外采样和室内分析,运用地统计学,研究土壤有机碳的空间分布特征,为优化干旱区土地资源管理措施和保护生态环境提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

博尔塔拉河流域(简称博河流域),位于 79°53′—83°53′E, 44°02′—45°23′N,流域总面积为 11 367 km<sup>2</sup>,流域全长 252 km。年均降水量是 90.90 mm,蒸发量高达 3 790 mm。博河流域发源于别珍套山汇合处的洪别林达坂,东西流向,南岸有乌尔达克赛河、大河沿子河,北岸有哈拉吐鲁克河汇入,流经温泉、博乐 2 县(市)注入艾比湖<sup>[17]</sup>。博尔塔拉河流域地形总态势为南北高中间低,西高东低。西、北、南三面环山,两山系之间为博尔塔拉谷地,向东逐渐呈喇叭口状敞开,东部艾比湖为流域的汇水中心,与准噶尔平原西部相连(图 1)。

### 1.2 样品采集与分析方法

在广泛收集相关资料的基础上,以研究区 1:2 500 000 地形图为基础底图,沿着博河共选取 92 个样点。将博河分成上、中、下 3 部分区域进行研究,平均间距为 5 km 取一个点。土壤的测定深度为 20 cm,相邻不同的 3 钻土样经混合后组成待测样品,总量大约 500 g,并对所有样品进行编号。采集后的样品带回中国科学院新疆生态与地理研究所中心实验

室,自然风干研磨全部过筛 2 mm 备用,用重铬酸钾氧化—外加加热法测定土壤有机碳的含量<sup>[18]</sup>。

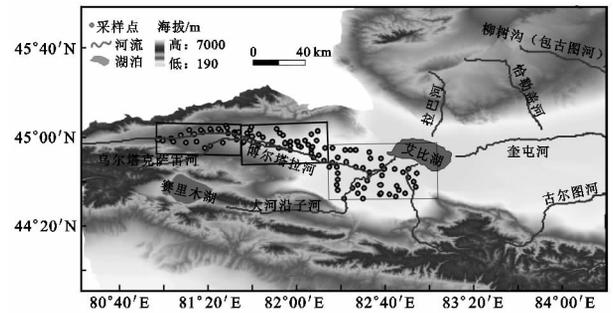


图 1 研究区采样点分布

### 1.3 地统计分析

地统计学是一种有效的空间分析方法,它是以区域化变量为核心和理论基础,以变量的空间相关性和变异函数为基本工具的一种数学统计方法<sup>[19]</sup>。区域化变量是一种既有随机性又有空间结构性的一种变量。地统计学方法以半方差函数和 Kriging 插值为基本工具,能对既具有随机性又具有结构性的各种变量在空间上的分布进行研究<sup>[20]</sup>。

半方差函数能较好地描述区域化变量的空间分布结构性和随机性,其中一些重要参数,可反映区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度,是研究土壤特性空间变异性的关键,同时也是进行精确 Kriging 插值的基础<sup>[21]</sup>,其表达式为:

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

式中: $r(h)$ ——变异函数; $h$ ——样点空间间隔,称为步长; $N(h)$ ——样点距离等于  $h$  时的点对总数; $Z(x_i)$ ——样点  $Z$  在位置  $x_i$  的实测值; $Z(x_i+h)$ —— $x_i$  与距离为  $h$  处样点的值。以  $r(h)$  为纵轴, $h$  为横轴,绘制  $r(h)$  随步长  $h$  增加而变化的散点图,对散点数据采用球状模型、指数模型、高斯和线性模型等理论模型进行拟合,并由决定系数  $R^2$  判断模型拟合的效果。

Kriging 是地统计学的主要内容,它是通过对已知样本点赋权重来求得未知点的值。

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中: $Z(x_0)$ ——未知采样点的值; $Z(x_i)$ ——未知样点周围的已知样本点的值; $i$ ——第  $i$  个已知样本点对未知样本点的权重; $n$ ——已知样本点的个数<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳的统计特征分析

2.1.1 土壤有机碳的描述性统计分析 描述性统计分析是对变量基本的分析,可以从传统统计学角度来解释变量的特征。本文将博河流域分为上、中、下 3

部分进行研究,利用 SPSS 19.0,对博河流域上、中、下 3 部分地区 0—20 cm 土层 92 个土壤样点的有机碳含量进行描述性统计分析。分析结果表明,总有机碳含量为 1.73~27.36 g/kg,平均值为 10.81 g/kg。其中,博河上部有机碳含量为 7.12~23.30 g/kg,平均值为 11.30 g/kg;中部有机碳含量为 3.46~22.60 g/kg,平均值为 10.86 g/kg;下部有机碳含量为 1.73~27.36 g/kg,平均值为 10.53 g/kg。说明博尔塔拉

河流域土壤有机碳含量比较低,且从流域上部往下部逐渐减少。这个研究结果与刘珊珊等<sup>[14]</sup>的研究结果:小流域上部向下部土壤侵蚀强度逐渐降低,土壤有机碳含量逐渐升高基本相似,都说明了土壤破坏程度大,有机碳含量就少。土壤有机碳的变异系数从上部到下部依次为 31.95%,34.81%,52.90%,都为中等强度的变异<sup>[22]</sup>,说明博河流域土壤有机碳的分布有一定的区域性差异(表 1)。

表 1 博河流域土壤有机碳的统计特征值

有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	样本数	极小值	极大值	极差	平均值	标准差	变异系数/%
上部	21	7.12	23.23	16.11	11.30	3.61	31.95
中部	28	3.46	22.60	19.14	10.86	3.78	34.81
下部	43	1.73	27.36	25.63	10.53	5.57	52.9

由于经典统计学方法只能反映土壤有机碳分布的总体,不能反映样本的独立性,解决这一问题的方法是进一步研究其空间变化的结构性,即应用地统计学的方法研究土壤有机碳的空间分布结构。

2.1.2 土壤有机碳的正态性检验 变异函数的计算一般要求数据符合正态分布,否则可能会使变异函数产生比例效应<sup>[23]</sup>。比例效应的存在会使试验变异函数产生畸变,会抬高基台值和块金值,增大估计误差,

变异函数点的波动大,甚至会掩盖其固有的结构,因此应该消除比例效应。在进行地统计分析前,先采用频数分布直方图法对土壤有机碳进行正态性检验。以频率作纵坐标,以有机碳值作横坐标,做出它的频数分布直方图。土壤有机碳是否属于正态分布,可由其分布直方图上看,两边大约对称的为正态分布,反之则不是。由图 2 可以看出,博河流域上、中、下部土壤有机碳均属于正态分布。

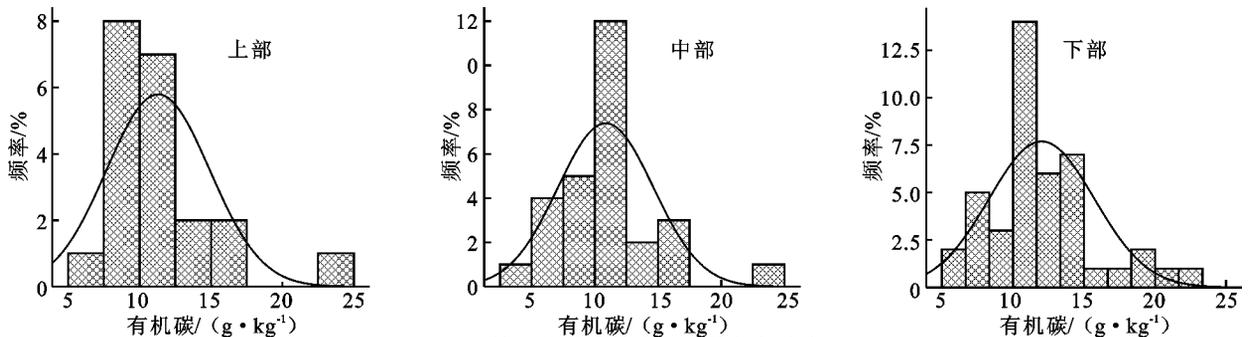


图 2 博河流域土壤有机碳的频数分布

## 2.2 土壤有机碳的空间结构分析

2.2.1 土壤有机碳空间分布的半方差分析 为确定随机因素对土壤有机碳的影响及土壤有机碳空间相关的范围,根据不同空间位置上壤有机碳的分析数据,计算实际半方差值,绘制散点图(图 3)。利用 GS+9.0 对研究区(0—20 cm)土壤有机碳进行空间变异理论模型的拟合,理论模型及模型参数结果见表 2。

由图 3 和表 2 可知,博河上部和下部土壤有机碳的半方差理论模型符合高斯模型;中部土壤有机碳的半方差理论模型符合线性模型。用理论模型对有机碳半变异函数进行拟合的结果很好,决定系数为 0.06~0.71 g/kg。说明依据这些理论模型可较好地评价研究区土壤有机碳的空间结构特征。

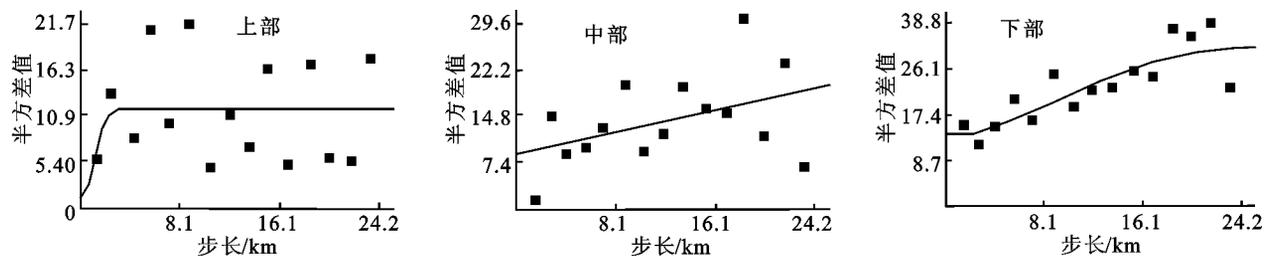


图 3 博河流域土壤有机碳的半方差函数

表 2 博河流域土壤有机碳的理论模型及相关参数

有机碳	理论模型	块金值 ( $C_0$ )	基台值 ( $C_0 + C$ )	块金/基台 $C_0 / (C_0 + C) / \%$	变程/km	决定系数
上部	高斯模型	0.76	11.62	93.5	2.65	0.06
中部	线型模型	8.65	18.57	54.9	23.35	0.19
下部	高斯模型	13.87	30.77	53.4	23.37	0.71

土壤有机碳分布由结构性因素(如气候、母质、地形、土壤类型、自然因素等)和随机性因素(如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动)决定,使得土壤有机碳的空间相关性减弱,朝均一化方向发展<sup>[20]</sup>。块金值( $C_0$ )表示主要由随机因素引起的空间变异,块金值与基台值的比值  $C_0 / (C_0 + C)$  表示空间变异程度,即随机部分引起的空间变异占系统总变异的比,常被用作研究变量空间相关的分类依据<sup>[24]</sup>。如果  $C_0 / (C_0 + C) < 25\%$  说明空间相关性强,表明结构性因素引起的空间变异起主要作用;如果  $C_0 / (C_0 + C)$  在  $25\% \sim 75\%$  之间则表现为中等空间相关性,表明结构性因素和随机因素共同起作用;如果  $C_0 / (C_0 + C) > 75\%$  则表现为弱空间相关性,表明只受随机性因素影响<sup>[25]</sup>。研究区土壤有机碳的块金值( $C_0$ ) 在  $0.76 \sim 13.87 \text{ g/kg}$  之间,都比较小。说明在本研究尺度上由随机因素引起的空间变异较小。博河上部块金方差与基台值之比  $C_0 / (C_0 + C) > 75\%$ , 表现为弱空间相关性,表明只受随机性因素影响。博河中部和下部的块金方差与基台值之比  $C_0 / (C_0 + C)$  分别为  $54.90\%$  和  $53.40\%$ , 都在  $25\% \sim 75\%$  之间,表现为中等空间相关性,表明结构性因素和随机因素共同起作用。这与李龙等<sup>[13]</sup> 的研究结论:土壤有机碳的空间变异主要是由结构性因素引起的,随机因素对其变异影响较小不太一致。这种结果可能是由于博河流域自上游到下游不同的地形、土壤类型以及人类活动方式的不同,使得有机碳含量的空间分布存在差异。

变程在分析空间变异时,有一定的指导意义和作用,可作为采样有效距离的参考。本文所布设的样点之间的平均间隔距离  $5 \text{ km}$ , 而土壤有机碳样点的变程均大于  $5 \text{ km}$ , 表明进行空间内插是有效的。变程(A)还用于确定模型的独立间距(相关距离)。它代表了变量的空间相关范围大小。在变程之内,变量具有空间自相关特性,反之则不存在<sup>[26]</sup>。变程(A)也是空间变异的重要参数,它可以表示土壤有机碳的空间变异程度,空间相关性强,变程就大,反之则小。由表 2 可以看出,所测的博河流域上、中、下部土壤有机碳变程依次为  $2.65, 23.35, 23.37$ , 显示为逐渐增大,而且从上部到下部的变程随着  $C_0 / (C_0 + C)$  减小而逐渐增大,说明从上部到下部空间相关性逐渐增大,这可能是由于流域上部区域人类活动较中下部区域频繁。

2.2.2 土壤有机碳的空间分布 基于半方差函数的建立,为了进一步准确而直观研究土壤有机碳空间分布特征,确定其结合方式,利用半变异函数模型进行普通的 Kriging 插值得到有机碳的含量分布图,详见图 4。

从图 4 可以看出:(1) 博尔塔拉河流域的土壤有机碳的空间分布特征主要以斑块状为主,基本与耕地分布相吻合。(2) 全流域最大值出现在下游,可能与耕作模式以及河流从上游携带大量营养物质,通过灌溉在下游土壤沉淀累积有关。(3) 博乐市周边土壤有机碳含量最低,这可能主要与博乐市周围为城市和工业用地有关。

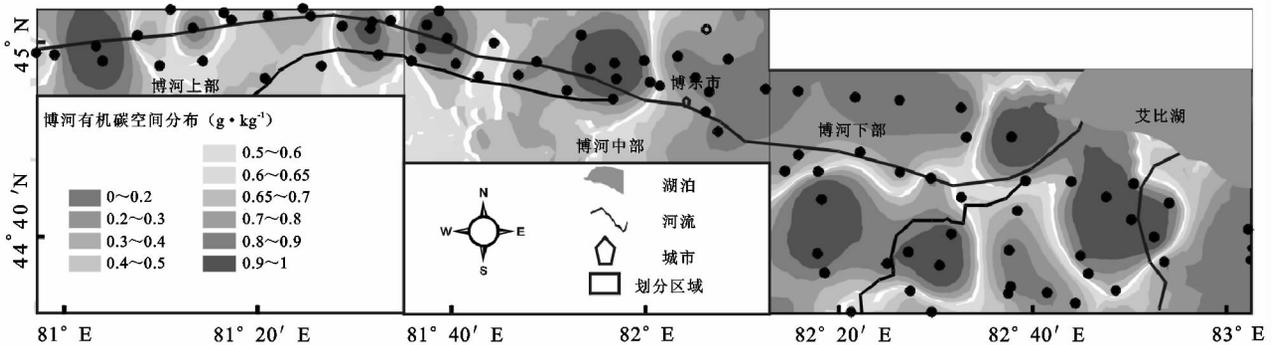


图 4 博河流域土壤有机碳含量的空间分布

### 3 结论

(1) 研究区表层土壤有机碳的含量统计特征值

显示,土壤有机碳符合正态分布。

(2) 半方差函数分析表明:博河上部和下部土壤有机碳较好地符合高斯模型分布,中部有机碳符合线

型模型分布。块金值与基台值的比值  $C_0/(C_0+C)$  表明博河上部表现为弱空间相关性,表明只受随机性因素影响;博河中部和下部表现为中等空间相关性,表明结构性因素和随机因素共同起作用。博河流域从上部到下部土壤有机碳含量的空间相关性逐渐增大。

(3) 从土壤有机碳的空间分布特征可以看出:博尔塔拉河流域土壤有机碳的空间分布特征主要以斑块状为主,基本与耕地分布相吻合。全流域最大值出现在下游,可能与耕作模式以及河流从上游携带大量营养物质,通过灌溉在下游土壤沉淀累积有关。博乐市周边土壤有机碳含量最低,这可能主要与博乐市周围为城市和工业用地有关。

#### 参考文献:

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [2] 刘允芬, 欧阳华, 曹广民, 等. 青藏高原东部生态系统土壤碳排放[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(2): 152-160.
- [3] 林丽, 曹广民, 徐世晓, 等. 青海盐湖碳源/汇功能初探[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(8): 22-26.
- [4] 王其兵, 李凌浩. 内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(5): 409-414.
- [5] 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 等. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *地理科学*, 2013, 33(3): 363-370.
- [6] 王玉刚, 肖笃宁, 李彦, 等. 三工河流域绿洲土壤有机碳的空间分布[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 101-107.
- [7] 唐晓红, 黄雪夏, 魏朝富. 不同尺度土壤有机碳空间分布特征研究综述[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(3): 224-228.
- [8] 孙慧兰, 李卫红, 杨余辉, 等. 伊利山地不同海拔土壤有机碳的分布[J]. *地理科学*, 2012, 32(5): 603-608.
- [9] 李林海, 郜二虎, 梦梦, 等. 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 179-187.
- [10] 王成己, 潘根兴, 田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析: 基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2464-2475.
- [11] 苏建红, 朱新萍, 王新军, 等. 长期围栏封育对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.
- [12] 余涛, 杨忠芳, 候青叶, 等. 我国主要农耕地水稻土壤有机碳含量分布及影响因素研究[J]. *地学前缘*, 2011, 18(6): 11-19.
- [13] 李龙, 吴丽芝, 姚云峰, 等. 小流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究: 以内蒙古赤峰市黄花甸子流域为例[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 18-23.
- [14] 刘珊珊, 宫渊波, 向香勇, 等. 雅安紫色土小流域土壤有机碳及碳组分分布特征[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 63-66.
- [15] 陈志军, 张晶, 卡米拉, 等. 博尔塔拉河流域水文特性[J]. *水资源研究*, 2007, 28(1): 25-28.
- [16] 王勇辉, 马蓓, 海米提·依米提. 艾比湖主要补给河流下游河岸带土壤盐分特征[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(2): 196-202.
- [17] 张建锋, 张旭东, 周金星, 等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(6): 32-34.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-38.
- [19] 阿依古丽·买买提, 吉力力·阿不都外力, 葛拥晓. 玛纳斯河流域绿洲土壤养分空间变异特征与格局[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 153-159.
- [20] 马黄群, 胡玉福, 徐柱, 等. 运用地统计学的土壤有机碳含量空间分布研究[J]. *地理空间信息*, 2012, 10(3): 75-80.
- [21] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [22] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [23] 李建辉, 李晓秀, 张汪寿, 等. 基于地统计学的北运河下游土壤养分空间分布[J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 1001-1006.
- [24] 杨秀清, 韩有志. 关帝山森林土壤有机碳和氮素的空间变异特征[J]. *林业科学研究*, 2011, 24(2): 223-229.
- [25] Gambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [26] 李有威, 刘源, 于娜, 等. 不同放牧强度下荒漠草原土壤有机碳的空间变异特征[J]. *内蒙古农业科技*, 2012(1): 58-60.