

## 汉江中游典型小流域土壤有效锌 空间变异特征及评价

黎恒明, 杨苗苗

(西安测绘信息技术总站, 陕西 西安 710043)

**摘要:**为了评价汉江中游典型小流域土壤有效锌的分布特征,利用网格法分 3 层在余姐河小流域采集土样,共采集 207 个样点。基于地统计学方法和 Kriging 插值法,结合坡向对土壤有效锌含量空间变异特征进行研究,并进行了丰缺评价。结果表明:随着土层深度的增加,土壤有效锌含量逐渐降低;经方差检验,仅 0~10 cm 土层土壤有效锌含量存在显著性差异;林地 0~10、20~40 cm 土层土壤有效锌含量与坡向呈显著正相关关系;草地 0~10 cm 土层土壤有效锌含量与坡向呈显著负相关关系,10~20、20~40 cm 土层呈极显著负相关关系;该流域 0~10 cm 土壤有效锌储量为 45.42 kg,土壤有效锌储量从大到小依次为林地、农地、草地;根据土壤有效态微量元素平均密度综合评价指数,该流域土壤有效锌处于丰富水平。

**关键词:**有效锌;空间变异;地统计学;Kriging 插值法;土地利用方式;坡向;汉江

**中图分类号:**S153.6

**文献标志码:**A

## Spatial Variation Characteristics and Evaluation of Soil Available Zinc in a Typical Small Watershed of the Middle Hanjiang River

LI Heng-ming, YANG Miao-miao

(The Station of Xi'an Information Technology of Mapping, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to evaluate the distribution characteristics of soil available zinc in a typical small watershed of the middle Hanjiang River, the 207 soil samples were collected with the depths of 0-10, 10-20, 20-40 cm in Yujiehe small watershed by the means of grid method. Based on geostatistics and Kriging interpolation, combined with the effect of aspect, the spatial variation characteristics of soil available zinc were discussed, and the abundance of soil available zinc was evaluated. The results show that the content of soil available zinc decreases with the increase of soil depth; according to the variance test, the differences of spatial variations of content of soil available zinc at 0-10 cm soil depth are significant; the correlation of content of soil available zinc and aspect for forestland is significant and positive in 0-10, 20-40 cm soil depths; the correlation of content of soil available zinc and aspect for grassland is significant and negative in 0-10 cm soil depth, and extremely significant and negative in 10-20 and 20-40 cm soil depths; the storage of soil available zinc is 45.42 kg in 0-10 cm soil depth, and there are forestland, cropland and grassland in descending order; According to the comprehensive evaluation index of average density of soil available trace elements, the soil available zinc is rich in Yujiehe small watershed of the middle Hanjiang River.

收稿日期:2016-07-05

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD31B01);国家自然科学基金重点项目(41330858);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM2-4036,2014JQ5175)

作者简介:黎恒明(1965-),男,江苏扬州人,高级工程师,工学博士,E-mail:wthuanjing@126.com。

**Key words:** available zinc; spatial variation; geostatistics; Kriging interpolation; land use type; aspect; Hanjiang River

## 0 引言

锌是植物生长所必需的微量元素之一,能促进植物光合作用、酶、生长素、蛋白质和核酸的合成,还可以提高植物的耐寒和抗病能力<sup>[1]</sup>。在无人施用锌肥的情况下,植物所需锌(有效态)的供给主要来源于土壤,故有效态的锌在一定条件下表征土壤锌元素的供给水平。土壤有效锌含量受土壤性质、成土过程和农耕活动等因素影响,空间分布不均匀,对植物的生长造成一定影响。科学区划有效锌含量范围对于作物生长及土壤生态环境保护十分必要。土壤有效锌含量的空间变异性研究是科学区划的基础。余存祖等通过对黄土高原土壤微量元素的研究,认为全量元素的高低不能反映植物对锌元素的需求状况<sup>[2]</sup>。近年来,国内外学者从土壤性质<sup>[3-7]</sup>、土地利用方式<sup>[8]</sup>、土地利用演替<sup>[9-10]</sup>和土壤养分<sup>[11]</sup>等角度对土壤有效锌分布的影响进行了大量研究,而就小流域的地形因子对土壤有效锌的空间分布特征的影响鲜有报道。地形对降雨在地表再分配以及剖面溶质运移有显著影响,影响微量元素的有效性<sup>[12-14]</sup>。本文以汉江中游典型小流域为对象,采用网格法和分层采样法,运用地统计学方法,对该区的土壤有效锌含量空间变异特征进行了研究,并估算了0~10 cm土层土壤有效锌的储量,以期为流域养分资源管理和治理措施布局的优化提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

余姐河小流域位于陕西省安康市汉滨区大同镇和恒口镇境内。余姐河属汉江一级支流月河左岸的二级支流,流域总面积为0.141 km<sup>2</sup>,平均河道比降为39.2‰。流域呈条带状,地势北高南低,相对高差为72 m。流域土壤主要为母岩风化的岩屑,杂以少量砂质黏土构成石碓土;植被为次生林,乔、冠混交,针、阔叶混交,上游植被较好,耕地分散,下游植被差,耕地相对集中,以坡耕地为主。流域内多年平均降水量为850.0 mm,实测最大年降水量为1 156.0 mm,最小年降水量为561.5 mm。降水量年内分配不均,一般夏季多雨,冬春少雨;7~10月为雨季,其降水量约占全年降水量的65%。

### 1.2 土壤样品采集和测定

在对研究区实地考察的基础上,结合实际地形

和土地利用方式,于2013年12月在研究区域以30 m×30 m网格进行土壤样品采集,采样点用GPS仪进行定位,共采样207个点。采样深度为40 cm,每个采样点分3层垂直采集土壤样品,即0~10、10~20、20~40 cm;样品分装后带回实验室分析。土样自然风干,经研磨和过筛后进行分析测定,计算结果以风干基计。

称取25.0 g风干土样放入180 mL塑料瓶中,加入50 mL的DTPA浸提液,在25℃时用振荡机振荡2 h,经过滤得到浸出液。测试仪器为北京普析通用仪器有限责任公司生产的原子吸收分光光度计。

### 1.3 数据分析与处理方法

运用SPSS16.0软件对数据进行描述性分析,采用GS+(7.0)软件计算半方差函数,运用ArcGIS9.3软件进行空间分析。

半方差函数理论模型可用来分析土壤有效锌含量的空间变异随机性和结构性。计算公式为

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

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数; $z(x_i)$ 、 $z(x_i + h)$ 为间隔步长 $h$ 的2个观测点实测值; $N(h)$ 为以 $h$ 为步长所有观测点的成对数目。

由 $r(h)$ 对 $h$ 作图可以得到半方差函数图。依据决定系数( $R^2$ )和残差平方和( $R_{ss}$ )对半方差函数进行拟合得到合理的理论模型。

土壤有效锌储量借鉴土壤有机碳的储量<sup>[15-16]</sup>计算公式,即

$$\left. \begin{aligned} C_{if} &= D_i \rho_{if} O_{if} / 100 \\ S_{if} &= A_f C_{if} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $C_{if}$ 为第 $f$ 种土地利用方式下第 $i$ 层土壤有效锌密度; $D_i$ 为第 $i$ 层土壤厚度; $\rho_{if}$ 为第 $f$ 种土地利用方式下第 $i$ 层土壤密度; $O_{if}$ 为第 $f$ 种土地利用方式下第 $i$ 层土壤有效锌含量(质量分数,下同); $S_{if}$ 为第 $f$ 种土地利用方式下第 $i$ 层土壤有效锌储量; $A_f$ 为采用第 $f$ 种土地利用方式的土壤面积。

土壤有效锌评价的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} E_f &= \sum_{i=1}^n C_{if} / n \\ P_f &= \frac{E_f}{\bar{X}_f} \\ P &= \sum_{f=1}^n P_f W_f \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $E_f$  为第  $f$  种土地利用方式下土壤有效锌平均密度;  $P_f$  为第  $f$  种土地利用方式下的评价指数;  $P$  为综合评价指数;  $X_f$  为第  $f$  种土地利用方式下土壤有效锌临界密度;  $W_f$  为第  $f$  种土地利用方式所占比例;  $n$  为土地利用方式总数。

## 2 结果分析

### 2.1 土壤有效锌剖面的统计特征

余姐河小流域 3 个土层深度下土壤有效锌统计特征见表 1。由表 1 可知, 3 个土层深度下土壤有效

锌含量的平均值均随土壤深度的增加而减少。每个采样土层的土壤有效锌含量的最大值和最小值差值均较大, 且土层深度越深, 极差越大。不同土层深度下土壤有效锌含量亦存在显著性差异。据 Nielson 等的分类系统, 当变异系数 ( $C_v$ ) 小于等于 10% 时, 土壤空间分布为弱变异, 当  $10\% < C_v < 100\%$  时, 其为中等变异, 当  $C_v \geq 100\%$  时, 其为强变异<sup>[17]</sup>。0~10、10~20、20~40 cm 土层土壤有效锌含量的变异系数分别为 36.95%、48.86%、48.60%, 表明他们都为中等变异。

表 1 不同土层深度下土壤有效锌含量的统计结果

Tab. 1 Statistical Results of Contents of Soil Available Zinc at Different Soil Depths

深度/cm	平均值/ $10^{-6}$	标准差/ $10^{-6}$	偏度	峰度	最小值/ $10^{-6}$	最大值/ $10^{-6}$	$P_a$	$C_v/\%$
0~10	2.49	0.92	1.01	2.23	0.75	6.91	0.315	36.95
10~20	2.19	1.07	1.18	1.70	0.37	6.47	0.070	48.86
20~40	2.14	1.04	0.98	0.95	0.31	5.56	0.082	48.60

由于 Kriging 插值法对正态分布预测较准, 所以在运用地统计学分析前, 需对土壤有效锌含量的正态分布情况进行检验。从 K-S 检验可以看出, 3 个土层下采样点的概率 ( $P_a$ ) 均大于 0.05, 表明其均服从正态分布(图 1)。

### 2.2 土壤有效锌空间分析

#### 2.2.1 空间结构分析

在 GS<sup>+</sup>(7.0) 软件中对 3 个土层深度下土壤有效锌含量进行半方差函数模拟得到半方差函数模型及参数值(表 2、图 2)。残差平方和与决定系数均最

高的模型为最优模型。0~10、10~20 cm 土层土壤有效锌含量的最优模型为高斯模型, 20~40 cm 土层为指数模型, 其决定系数为 0.81~0.86, 且残差平方和也均较小, 表明模型的拟合精度较好, 可以很好地反映研究区土壤有效锌含量的空间分布特征。变程反映了区域化变量在空间上自相关范围的大小。3 个土层深度下土壤有效锌含量的变程均随采样深度的增加而增大, 变程的最小值为 40.27 m, 大于本次网格采样的间距 30 m, 表明本次采样达到空间分析的要求。

表 2 不同土层深度下土壤有效锌含量地统计学参数

Tab. 2 Geostatistics Parameters of Contents of Soil Available Zinc at Different Soil Depths

深度/cm	块金值	基台值	块金系数/%	变程/m	模型	$R^2$	$R_{ss}$
0~10	0.480	0.638	75.2	40.27	高斯模型	0.86	0.016
10~20	0.571	0.887	64.2	47.81	高斯模型	0.81	0.042
20~40	0.734	1.136	64.6	86.74	指数模型	0.83	0.043

块金系数表示系统内变量的空间相关性程度。若块金系数小于 25%, 说明系统具有强烈的空间相关性; 若块金系数在 25%~75% 之间, 说明系统具有中等的空间相关性; 若块金系数大于 75%, 说明系统空间相关性很弱。由表 2 可知: 0~10 cm 土层土壤有效锌含量的块金系数为 75.2%, 空间上表现为弱的相关性, 但其值很接近 75.0%, 可以视为中等的空间相关性; 10~20、20~40 cm 土层的分别为 64.2% 和 64.6%, 表现为中等的空间相关性。这说明土壤有效锌的空间变异性受随机因素影响更显著。

#### 2.2.2 空间插值分析

为了更直观地反映土壤有效锌含量的空间分布特征, 根据最优模型对 3 个土层深度下土壤有效锌含量进行 Kriging 插值, 绘制了土壤有效锌含量的空间分布图(图 3)。从图 3 可以看出: 随着土层深度的增加, 土壤有效锌含量呈降低的趋势, 且变化范围也逐渐缩小; 0~10 cm 土层含量最高, 10~20 cm 土层明显比 0~10 cm 土层小, 土壤有效锌含量在  $(1.3 \sim 3.2) \times 10^{-6}$  之间; 0~10 cm 土层土壤有效锌含量高的区域, 10~20 cm 土层也相对较高; 20~40 cm 土层相对于 10~20 cm 土层变化不大, 土壤有效锌含

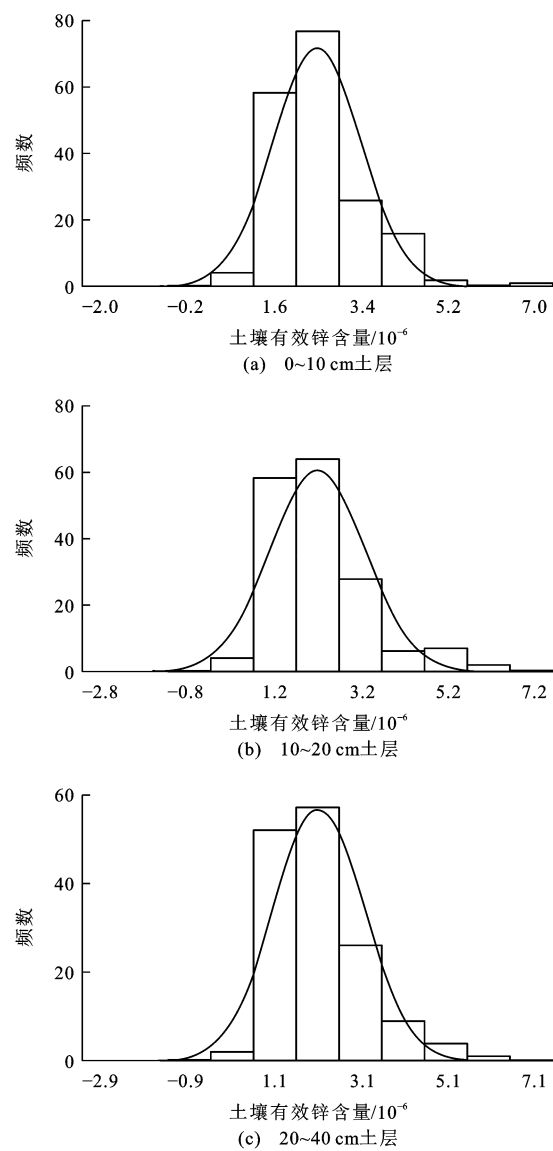


图 1 不同土层深度下土壤有效锌含量正态分布曲线  
Fig.1 Normal Distribution Curves of Contents of Soil Available Zinc at Different Soil Depths

量在 $(1.3\sim3.0)\times10^{-6}$ 之间。

2.3 土壤有效锌含量分布的影响因素

2.3.1 土地利用方式

不同土地利用方式下土壤有效锌含量及密度的平均值见表 3。从表 3 可以看出:0~10 cm 土层土壤

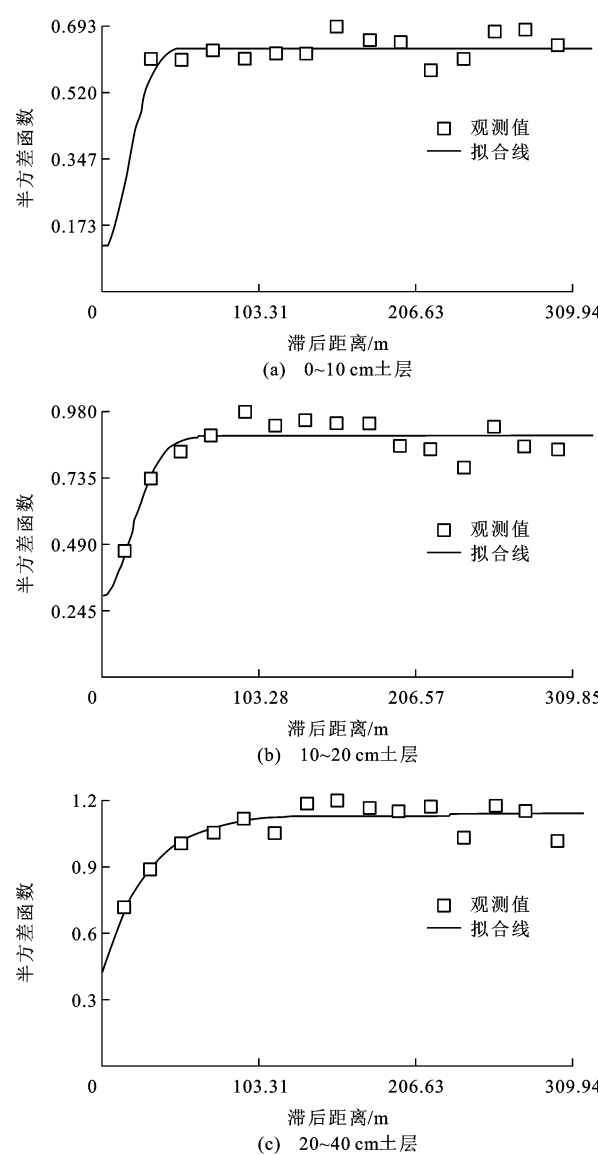


图 2 不同土层深度下土壤有效锌含量的半方差函数模型  
Fig.2 Semi-variance Models of Contents of Soil Available Zinc at Different Soil Depths

有效锌含量由高到低依次为草地、林地、农地;10~20、20~40 cm 土层由高到低依次为草地、农地、林地。经方差检验,仅 0~10 cm 土层不同土地利用方式下土壤有效锌含量存在显著性差异( $P_a<0.05$ ),10~20、20~40 cm 土层差异不显著( $P_a>0.05$ )。

表 3 不同土地利用方式下土壤有效锌含量及密度的统计结果

Tab.3 Statistical Results of Contents and Densities of Soil Available Zinc with Different Land Use Types

深度/cm	农地		林地		草地	
	有效锌含量/ $10^{-6}$	密度/ $(g\cdot cm^{-3})$	有效锌含量/ $10^{-6}$	密度/ $(g\cdot cm^{-3})$	有效锌含量/ $10^{-6}$	密度/ $(g\cdot cm^{-3})$
0~10	2.27	1.31	2.44	1.29	2.55	1.44
10~20	2.16	1.55	2.07	1.53	2.36	1.56
20~40	2.08	1.59	1.97	1.61	2.28	1.61

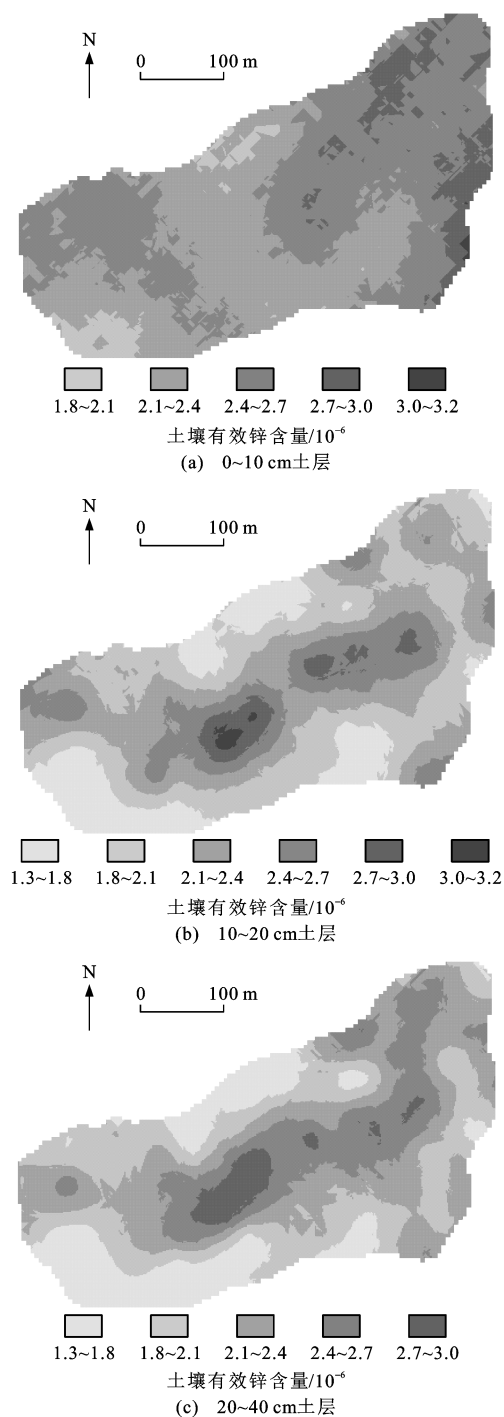


图3 不同土层深度下土壤有效锌含量的空间分布  
Fig.3 Spatial Distributions of Contents of Soil Available

#### Zinc at Different Soil Depths

不同土地利用方式下,土壤密度由高到低依次为草地、农地、林地,且土壤密度均随土层深度的增加而增大。

#### 2.3.2 坡 向

研究区域海拔和坡度差异不大,因此,坡向对土壤有效锌含量分布影响较大。表4分析了不同土地利用方式下土壤有效锌含量与坡向的相关关系。由

表4可以看出:3个土层深度下土壤有效锌含量与坡向均未显示显著相关关系,可能是土地利用方式对土壤有效锌的影响弱化了坡向的影响。林地0~10、20~40 cm土层土壤有效锌含量与坡向呈显著正相关关系( $P_a < 0.05$ );草地0~10 cm土层呈显著负相关关系( $P_a < 0.05$ ),10~20、20~40 cm土层呈极显著负相关关系( $P_a < 0.01$ )。

表4 草地和林地土壤有效锌含量与坡向的相关性

Tab.4 Correlations Between Contents of Soil Available Zinc and Aspect for Grassland and Forestland

地形因子	林地			草地		
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm
坡向 $P_a$	0.260	0.035	0.268	-0.295	-0.358	-0.376

根据研究区实际地形,将坡向划为阳坡、半阳坡、阴坡和半阴坡。不同坡向下的土壤有效锌含量平均值见表5。由表5可知:0~10 cm土层土壤有效锌含量平均值由高到低依次为阳坡、半阴坡、半阳坡、阴坡;10~20 cm土层为阳坡、半阳坡、半阴坡、阴坡;20~40 cm土层为阳坡、半阳坡、阴坡、半阴坡;同一坡向下土壤有效锌含量平均值也随土层深度的增加而减少。土地利用方式对0~10 cm土层土壤有效锌含量的分布有显著影响;坡向对林地和草地土壤有效锌含量的分布有显著影响。

表5 不同坡向下的土壤有效锌含量统计结果

Tab.5 Statistical Results of Contents of Soil Available Zinc at Different Aspects  $10^{-6}$

坡向	不同土层深度(cm)下的土壤有效锌含量均值		
	0~10	10~20	20~40
阳坡	7.81	7.37	6.56
半阳坡	7.39	6.52	6.08
阴坡	7.29	5.90	5.78
半阴坡	7.62	5.93	5.47

#### 2.4 土壤有效锌储量估算

将余姐河小流域划分成网格大小为1 m×1 m的单元,共570行×414列。根据式(2)计算得到土壤有效锌密度。由于0~10 cm土层是土壤侵蚀和养分流失的主要土层,故对0~10 cm土层土壤有效锌密度进行Kriging插值,得到不同土地利用方式下土壤有效锌密度及储量(表6),以便更直观地反映土壤有效锌含量的空间分布特征和潜在流失量,从而对易流失的区域进行有效控制。

0~10 cm土层不同土地利用方式下的土壤有效锌密度空间分布见图4。由图4可以看出:土壤



表 6 0~10 cm 土层不同土地利用方式下  
土壤有效锌密度及储量

Tab. 6 Density and Storage of Soil Available Zinc at 0-10 cm  
Soil Depth with Different Land Use Types

土地利用 方式	面积/ km <sup>2</sup>	密度最小值/ (g·m <sup>-3</sup> )	密度最大值/ (g·m <sup>-3</sup> )	密度平均值/ (g·m <sup>-3</sup> )	储量/ kg
农地	0.478	0.238	0.418	0.313	14.96
林地	0.441	0.248	0.397	0.320	14.11
草地	0.474	0.265	0.406	0.345	16.35

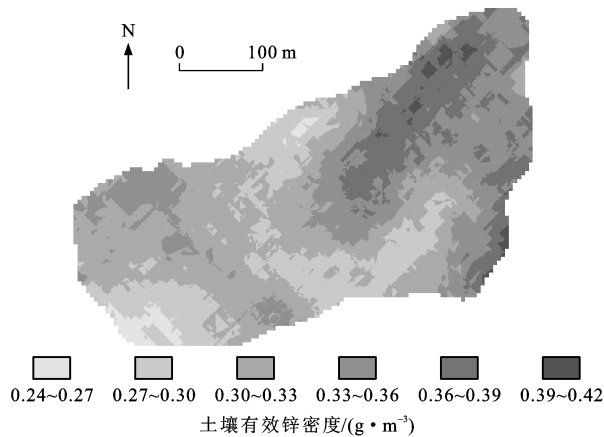


图 4 0~10 cm 土层土壤有效锌密度空间分布  
Fig. 4 Spatial Distribution of Density of Soil Available  
Zinc at 0-10 cm Soil Depth

表 7 土壤有效锌含量评价标准

Tab. 7 Evaluation Criteria of Contents of Soil Available Zinc 10<sup>-6</sup>

类别	极低	低	中等	丰富	极丰富	临界值
评价指数	(0, 0.5]	(0.5, 1.0]	(1.0, 2.0]	(2.0, 5.0]	(5.0, +∞)	1.0

表 8 土壤有效锌密度评价结果

Tab. 8 Evaluation Results of Density of Soil Available Zinc

土地利用 方式	密度平均值/ (g·m <sup>-3</sup> )	密度临界值/ (g·m <sup>-3</sup> )	$P_f$	$P$
农地	0.332	0.151	2.20	2.19
林地	0.319	0.151	2.11	
草地	0.349	0.156	2.24	

3 讨 论

3 个土层深度下土壤有效锌含量在空间上均表现为中等相关性,说明土壤有效锌的分布是由结构性因素和随机因素相互作用的结果。结构性因素(如气候、母质、地形和土壤类型等自然因素)与土壤养分空间相关性强烈;随机因素(如种植制度、耕作措施、施肥和管理方式等人类活动)与土壤养分空间相关性削弱,朝均一化方向发展<sup>[19]</sup>。3 个土层深度下块金系数均随土壤深度的增加而减小,10~20、

有效锌含量呈东部高、西部低的趋势,西部即为该流域土壤侵蚀养分流失的重要控制区。从表 6 可以看出:0~10 cm 土层不同土地利用方式下土壤有效锌密度由低到高依次为草地、林地、农地,分别为 0.313、0.320、0.345 g·m<sup>-3</sup>;0~10 cm 土层土壤有效锌储量为 45.42 kg,其中农地、草地、林地分别为 14.96、14.11、16.35 kg。

2.5 土壤锌的有效性评价

目前,中国关于土壤有效态微量元素的评价标准根据为“全国农业系统的土壤速效微量元素丰缺指标”和“中国科学院微量元素组的土壤有效态微量元素评价指标”,将土壤有效锌供给水平划分为 5 个等级(表 7)<sup>[18]</sup>。但是,在实际使用中发现同一块地由于不同土层之间的深度、密度等差异,可能导致各层评价结果不在同一等级上,所以提出采用土壤有效态微量元素平均密度指标进行评价。土壤有效锌的临界值根据土壤有效锌评价标准结合式(2)、(3)计算得到(表 8)。不同土地利用方式下土壤有效锌评价指数从大到小依次为草地、农地、林地,分别为 2.24、2.20、2.11,均超过临界值的 2 倍,说明研究区不同土地利用方式下土壤有效锌均处于丰富水平。从综合评价指数来看,研究区土壤有效锌是其临界值的 2.19 倍,说明整个流域土壤有效锌较丰富。

20~40 cm 土层相差不大;块金系数越大表明其受随机因素影响越大,0~10 cm 土层块金系数最大,这与研究区位于土石山区,土层较薄,土壤受母质风化速度、地表植被及外界等随机因素影响较大有关。

从整个流域不同深度下土壤有效锌含量与坡向的关系来看,阳坡土壤有效锌含量大于阴坡,林地土壤有效锌含量与坡向呈显著正相关关系。坡向可以改变水分和温度条件,进而影响动植物的活动,良好的光照条件可以促进有机质分解成腐殖质,从而降低土壤的 pH 值,促进有效锌的释放。阳坡光照较强,土壤温度相对较高,蒸发量大,土壤含水量相对较低,土壤微生物的活性强,土壤有机物质分解速率较高;阴坡则反之。张会民等认为土壤温度的日变化和年变化对锌的吸附过程和吸附量均有显著影响<sup>[20]</sup>。Aharoni 等依据热动力学原理,认为金属离子吸附量随土壤温度的升高而增加<sup>[21]</sup>。本文研究结果与 Aharoni 等的研究结果<sup>[21]</sup>有相似性,但也存

在一定差异。从整个流域不同深度下土壤有效锌含量与坡向的关系来看,较高温度可以促进有效锌的释放;但从土地利用方式来看,草地土壤有效锌含量与坡向呈显著负相关关系,因此,土壤有效锌含量有较大的区域性,分析时需要同时考虑土壤类型和理化性质等因素的影响。

土壤有效锌储量从高到低依次为林地、农地、草地,而土壤有效锌含量从高到低依次为草地、林地、农地。农地占地面积最大,有效锌储量不高,有效锌含量相对最小,因此,需加强对土壤有效锌流失的控制。前人对土壤碳储量研究较多,关于土壤有效锌含量的研究多集中在不同区域的土壤有效锌含量分布特征和影响因素上,而对土壤有效锌储量研究较少。通过对汉江中游余姐河小流域表层土壤有效锌储量的估算,为水源区的保护和种植管理措施提供了一定依据。本文提出的土壤有效态微量元素平均密度综合评价指数避免了同一块地不同深度的差异性评价,为更合理评价土壤环境质量提供了思路。

## 4 结 语

(1)汉江中游余姐河小流域随着土层深度的增加,土壤有效锌含量逐渐减小,且存在显著性差异( $P_a < 0.05$ )。3个土层深度下土壤有效锌含量均为中等变异,随土层深度的增加,变异强度先增大后减小。

(2)0~10、20~40 cm土层深度下土壤有效锌含量的最优模型为高斯模型,20~40 cm土层为指数模型。不同土层深度下土壤有效锌含量的空间分布呈岛状格局,且随深度的增加,土壤有效锌含量及变化范围逐渐减小,土壤有效锌含量由高到低依次为草地、林地、农地。

(3)土地利用方式和坡向对土壤有效锌含量有显著影响。不同土地利用方式下0~10 cm土层土壤有效锌含量存在显著性差异( $P_a < 0.05$ )。林地0~10、20~40 cm土层土壤有效锌含量与坡向呈显著正相关关系( $P_a < 0.05$ )。草地不同土层土壤有效锌含量与坡向均呈显著负相关关系。

(4)0~10 cm土层土壤有效锌储量为45.42 kg,农地、草地、林地分别为14.96、14.11、16.35 kg。

(5)不同土地利用方式下土壤有效锌评价指数均为临界值的2~3倍,处于丰富水平。从综合评价指数来看,土壤有效锌是其临界水平的2.19倍,整个流域土壤有效锌处于丰富水平。

## 参考文献:

## References:

- [1] LIN Y P, TENG T P, CHANG T K. Multivariate Analysis of Soil Heavy Metal Pollution and Landscape Pattern in Changhua County in Taiwan[J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 62(1): 19-35.
- [2] 余存祖, 彭琳, 刘耀宏, 等. 黄土区土壤微量元素含量分布与微肥效应[J]. 土壤学报, 1991, 28(3): 317-326.  
YU Cun-zu, PENG Lin, LIU Yao-hong, et al. Content and Distribution of Trace Elements and Fertilizer Efficiency in Soils of Loessal Region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1991, 28(3): 317-326.
- [3] 廖琴, 南忠仁, 王胜利, 等. 黑河流域中部土壤微量元素有效态含量的空间变异及丰缺评价[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 108-113.  
LIAO Qin, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, et al. Spatial Variability and Abundance Evaluation of Available Microelements in the Middle Reaches of Heihe River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(2): 108-113.
- [4] 曾昭华. 长江中下游地区地下水中化学元素的背景特征及形成[J]. 地质学报, 1996, 70(3): 262-269.  
ZENG Zhao-hua. The Background Features and Formation of Chemical Elements of Groundwater in the Area of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70(3): 262-269.
- [5] 刘合满, 张兴昌, 苏少华. 黄土高原主要土壤锌有效性及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 898-902.  
LIU He-man, ZHANG Xing-chang, SU Shao-hua. Available Zinc Content and Related Properties of Main Soil in the Loess Plateau[J]. Journal of Agro-environment Science, 2008, 27(3): 898-902.
- [6] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30-37.  
LIU Zheng. Regularities of Content and Distribution of Zinc in Soils of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1994, 27(1): 30-37.
- [7] HANSEL C M, FENDORF S, SUTTON S, et al. Characterization of Fe Plaque and Associated Metals on the Roots Mine-waste Impacted Aquatic Plants[J]. Environmental Science and Technology, 2001, 35(19): 3863-3868.
- [8] 郭广慧, 张航程. 宜宾市城市土壤锌含量的空间分布特征及污染评价[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 125-133.  
GUO Guang-hui, ZHANG Hang-cheng. Spatial Dis-

- tribution and Pollution Assessment of Zn in Urban Soils of Yibin, Sichuan Province [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(1): 125-133.
- [9] 陈超, 杨丰, 刘洪来, 等. 贵州喀斯特地区草地开垦对土壤微量元素的影响与评价[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 230-237.
- CHEN Chao, YANG Feng, LIU Hong-lai, et al. Effects and Evaluation of Soil Trace Elements After Grassland Converted into Cropland in Guizhou Karst Area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(7): 230-237.
- [10] 李玉婷, 张建军, 田宁宁, 等. 黄土高原半干旱区退耕还林对土壤微量元素的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 113-120.
- LI Yu-ting, ZHANG Jian-jun, TIAN Ning-ning, et al. Effects of Grain for Green Project on Soil Microelements in Semi-arid Area of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 113-120.
- [11] 史文娇, 汪景宽, 魏丹, 等. 黑龙江省南部黑土区土壤微量元素空间变异及影响因素: 以双城市为例[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 342-347.
- SHI Wen-jiao, WANG Jing-kuan, WEI Dan, et al. Spatial Variability of Soil Trace Elements in Black Soil Region of South Heilongjiang Province and Its Affecting Factors: A Case Study of Shuangcheng City [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 342-347.
- [12] 杨媛媛, 李占斌, 宋晓强, 等. 丹江水源区小流域土壤有效铁空间分布特征[J]. *西安理工大学学报*, 2015, 31(2): 201-206.
- YANG Yuan-yuan, LI Zhan-bin, SONG Xiao-qiang, et al. Spatial Distribution of Soil Available Iron in a Small Watershed of Danjiang River Water Resource District [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(2): 201-206.
- [13] 钱进, 王子健, 单孝全. 土壤中微量金属元素的植物可给性研究进展[J]. *环境科学*, 1995, 16(6): 73-75, 78.
- QIAN Jin, WANG Zi-jian, SHAN Xiao-quan. Progress in the Investigation on Plant Availability of Soil Trace Metals [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1995, 16(6): 73-75, 78.
- [14] 张秀芝, 鲍征宇, 马忠社, 等. 土壤生态系统微量元素的生物有效性研究现状[J]. *地球与环境*, 2006, 34(3): 15-22.
- ZHANG Xiu-zhi, BAO Zheng-yu, MA Zhong-she, et al. Status Quo of Research on the Bioavailability of Trace Elements in Soil Environmental Ecosystem [J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(3): 15-22.
- [15] 孙文义, 郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2011, 31(6): 1604-1616.
- SUN Wen-yi, GUO Sheng-li. The Spatial Distribution of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Hilly Region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1604-1616.
- [16] 王添, 任宗萍, 张维, 等. 丹江中游典型小流域土壤有效锌的空间分布特征[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(3): 82-88.
- WANG Tian, REN Zong-ping, ZHANG Wei, et al. Spatial Distribution of Soil Available Zinc in a Typical Watershed of Middle Danjiang River [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2016, 44(3): 82-88.
- [17] NIELSEN D R, BOUMA J. Soil Spatial Variability [R]. Wageningen: Wageningen University, 1985.
- [18] 刘洪来, 杨丰, 黄顶, 等. 农牧交错带草地开垦对土壤有效态微量元素的影响及评价[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 155-160.
- LIU Hong-lai, YANG Feng, HUANG Ding, et al. Effect and Evaluation of Soil Trace Elements After Grassland Converted Intocropland in Agro-pasture Ecotone of Northern China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7): 155-160.
- [19] 徐国策, 李占斌, 李鹏, 等. 丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1547-1555.
- XU Guo-ce, LI Zhan-bin, LI Peng, et al. Spatial Distribution of Soil Total Nitrogen in a Typical Watershed of the Middle Danjiang River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1547-1555.
- [20] 张会民, 吕家珑, 徐明岗, 等. 土壤性质对锌吸附影响的研究进展[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(5): 114-118.
- ZHANG Hui-min, LU Jia-long, XU Ming-gang, et al. Advances in Properties' Effect on Zinc Absorption [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2006, 34(5): 114-118.
- [21] AHARONI C, UNGARISH M. Kinetics of Aetivated Chemisorption; Part 3, Amount and Distribution of Adsorbate at Varying Temperatures and Pressures [J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1977, 73: 1943-1950.