

网络出版时间:2016-02-02 09:37 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.03.012
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160202.0937.024.html

丹江中游典型小流域土壤有效锌的空间分布特征

王 添¹,任宗萍¹,张 维²,李 鹏¹,徐国策¹

(1 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,陕西 西安 710048;
2 陕西省咸阳市种苗站,陕西 咸阳 712000)

[摘 要] 【目的】研究丹江中游典型小流域土壤有效锌的空间分布特征,为流域养分资源管理和治理措施的优化提供科学依据。【方法】2011-12,利用网格取样和典型样地取样相结合的方法,在陕西丹江中游鹦鹉沟小流域分 3 层(0~10,10~20,20~40 cm)采集 185 个样点的土样,测定其有效锌含量,采用地统计分析和 Kriging 插值的方法,对鹦鹉沟小流域土壤有效锌含量的空间分布特征进行研究,并分析了土地利用和地形对有效锌分布的影响。【结果】土壤有效锌含量随土层深度的增加而降低,不同土地利用类型下土壤有效锌含量平均值表现为林地>农地>草地。3 个土层土壤有效锌含量与海拔呈现出显著($P<0.05$)或极显著负相关性($P<0.01$),农地土壤有效锌含量与坡度、坡向和海拔均呈现出极显著负相关性($P<0.01$)。研究区 3 个土层下,模拟 0~10 和 20~40 cm 土层有效锌含量的最优模型为线性模型,模拟 10~20 cm 土层有效锌含量的最优模型为指数模型。Kriging 插值结果表明,研究区土壤有效锌的空间分布呈带状格局,呈东部低西部高的变化趋势。【结论】影响研究区土壤有效锌含量分布的主要因素是土地利用类型和海拔;研究区大部分土壤有效锌含量处于较低水平。

[关键词] 土壤有效锌;土地利用;丹江;小流域

[中图分类号] S143.7⁺2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2016)03-0082-07

Spatial distribution of soil available zinc in a typical watershed of middle Danjiang River

WANG Tian¹,REN Zong-ping¹,ZHANG Wei²,LI Peng¹,XU Guo-ce¹

(1 State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 Seedlings Station of Xianyang, Shaanxi, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: 【Objective】The spatial distribution of soil available zinc (SAZ) was studied in a typical small watershed of the middle reaches of Danjiang River to provide scientific basis for nutrient resource management and control measures of watershed. 【Method】Combined with grid and typical spot samples, 185 sites were collected with three soil layers (0—10 cm (A1), 10—20 cm (A2), and 20—40 cm (A3)) at the Yingwugou watershed of Danjiang River in Shanxi in 2011-12. The spatial distribution of SAZ was studied by geostatistical analysis and Kriging interpolation, and the impact of land use and terrain conditions was analyzed. 【Result】The content of SAZ decreased with the increase of soil depth. The average SAZ contents of different land use types were in the order of woodland>farmland>grassland. There was extremely significant ($P<0.01$) or significant ($P<0.05$) correlation between the SAZ content and eleva-

【收稿日期】 2014-08-04
【基金项目】 国家科技支撑计划项目(2011BAD31B01);国家自然科学基金项目(41401316);水利部公益性行业科研专项(201201084);陕西省自然科学基金研究计划项目(2014JQ5175)
【作者简介】 王 添(1989—),男,河南南阳人,在读硕士,主要从事水土保持生态修复与环境保护研究。
E-mail: wthuanjing@126.com
【通信作者】 李 鹏(1974—),男,山东烟台人,教授,博士,博士生导师,主要从事水土资源与环境研究。
E-mail: lipeng74@163.com

tion. SAZ in cropland was significantly correlated with slope, aspect and elevation ($P < 0.01$). In three soil depths, the best fitted model was linear model indicating moderate spatial dependence in A1 and A3. The best fitted model in A2 was exponential model indicating moderate spatial dependence. The spatial distribution of SAZ was zonal pattern using Kriging interpolation, and SAZ content was lower in the eastern part than in western part. 【Conclusion】 The SAZ was mainly affected by the land use and elevation, and the SAZ content was at a low level in the study area.

Key words: soil available zinc; land use; Danjiang River; small watershed

锌是植物生长所必需的微量元素之一,一定量的锌能够促进植物光合作用酶、生长素、蛋白质和核酸的合成;另外锌可以提高植物的耐寒和抗病能力^[1]。在正常情况下,植物所需的锌(有效锌)主要来源于土壤,故有效锌在一定条件下可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的影响,其空间分布不均匀,从而使有些区域有效锌含量缺乏或过量,对植物生长造成一定的影响。故科学区划有效锌含量范围对于农作物生长及土壤生态环境保护很有必要。了解土壤有效锌含量的空间变异性是有效锌科学区划的基础,因此对研究区域进行有效锌空间变异的研究非常重要。目前,对土壤养分的变异研究主要集中在氮^[2]、有机碳^[3]和有机质^[4]等养分上,对于土壤微量元素的研究也多偏重于微量元素的全量分析^[5-7],对有效态含量的研究相对较少。余存祖等^[8]对黄土高原地区土壤的研究表明,全量元素的高低不能反映微量元素的有效态含量。近年来,国内外学者从土壤性质^[9-12]及不同土地利用方式^[13]对土壤有效锌的分布进行了许多研究,但关于小流域土壤有效锌空间分布特征的研究尚鲜有报道。

本试验以丹江中游鹦鹉沟小流域为研究对象,结合地形因子采用网格法和分层采样,运用地统计学的方法,对该地区土壤有效锌含量的空间变异特征进行了研究,以期对流域养分资源管理和治理措施的优化布局提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鹦鹉沟小流域位于陕西省商洛市商南县城东南约 2 km 处的城关镇五里铺村,位于东经 $110^{\circ}52'16'' \sim 110^{\circ}55'30''$ 、北纬 $33^{\circ}29'55'' \sim 33^{\circ}33'50''$ 。流域总面积 1.86 km^2 ,流域内主沟长 $3\,232.90 \text{ m}$,最大主沟道比降 0.01 ,流域坡面比降 0.33 ,属于多边形水系。流域大部分为低山丘陵地貌,沟谷开阔,最高海拔 600 m ,最低海拔 464 m ;年

平均降水量 803.2 mm ,其中 7—9 月份的降水量占全年降水量的 50%左右,且多以暴雨形式出现。

流域内土壤以黄棕壤为主,坡面有效土层厚度为 $20 \sim 70 \text{ cm}$;土地利用类型以农地、林地和草地为主;乔木以栎树、松树为主,灌木树种较多且杂,草地以禾本科草为主,林草覆盖率在 60%以上;农作物以小麦、玉米和花生为主^[2]。

1.2 土壤样品的采集

在对研究区进行实地勘察的基础上,结合其实际地形及土地利用方式,于 2011-12 在研究区域以 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 网格进行土壤样品采集,采样点以 GPS 定位,共 185 个点(图 1),分布于整个流域。

土样采集深度为 40 cm ,每个采样点分别按 $0 \sim 10$, $10 \sim 20$, $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层采集样品,分装后带回实验室。将土样在自然状态下风干,经研磨和过筛后进行分析测定。

1.3 测定项目与方法

称取 25.0 g 风干土样放入 180 mL 塑料瓶中,加入 50.00 mL 的 DTPA 浸提液,在 25°C 下用振荡机振荡 2 h ,过滤后得到浸出液,用北京普析公司生产的原子吸收分光光度计测定土壤有效锌含量。称取经研磨为 0.149 mm 的风干土样 0.1 g 于白色陶瓷取样舟内,然后加入 $1 \sim 2$ 滴 0.1 mol/mL 的盐酸,充分润湿后在 105°C 下恒温烘 4 h ,取出后静置冷却 12 h ,然后用德国耶拿公司的 TOC 分析仪测定土壤总有机质含量。

1.4 数据分析与处理方法

运用 SPSS 16.0 对试验数据进行描述性分析;采用 Pearson 进行相关性检验;半方差函数采用 $\text{GS}^+(7.0)$ 进行计算;运用 ArcGIS(9.3)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空间变异的随机性和结构性。该函数表达式为:

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

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数; $[z(x_i) - z(x_i + h)]$ 为间

隔为 h 的 2 个观测点的实测值; $N(h)$ 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 RSS 对半方差函数进行拟合得到合理的理论模型。

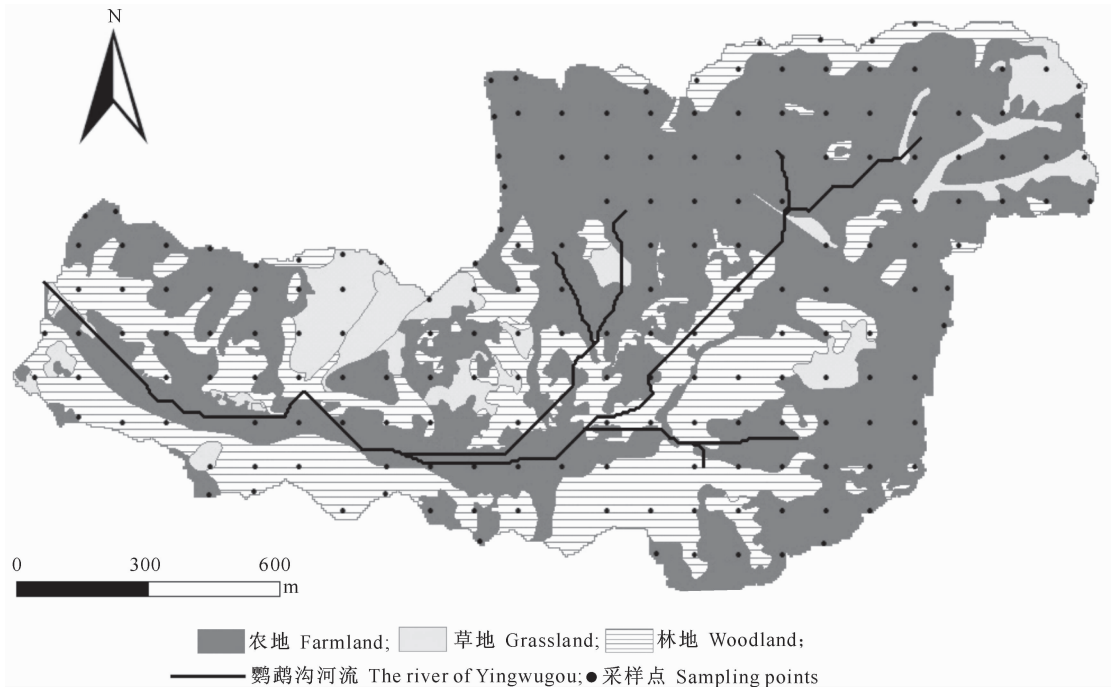


图 1 研究区土地利用情况及采样点分布

Fig. 1 Land use and distribution of sampling points in the study area

2 结果与分析

2.1 不同土层深度有效锌含量的分布特征

从表 1 可以看出, 随着土层深度的增加土壤有效锌的含量平均值逐渐减小, 其中 10~20 与 20~40 cm 土层有效锌含量平均值变化不大。0~10, 10~20, 20~40 cm 土层土壤有机质含量平均值分别为 9.10, 5.83 和 6.54 g/kg。对不同深度土层下有效锌含量与有机质进行相关性分析, 结果仅 0~10 cm 土层土壤有效锌与有机质呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 这与 Wei 等^[14]、Mackowiak 等^[15] 和 Phillips^[16] 的研究结果一致。有效锌在土层中的这种分布形式

与动植物残体在土壤中的分布关系密切, 动植物残体大部分存在于土壤表层, 随土层深度的增加逐渐减少^[2]。动植物残体的存在提高了有机物的含量, 而有机物的分解物可以促进有效锌的形成。

不同土层土壤有效锌含量的变异系数 (CV) 为 41%~63%。据 Nielson 等^[17] (1985) 的分类系统 ($CV\leq 10\%$, 弱变异; $10\%<CV<100\%$, 中等变异; $CV\geq 100\%$, 强变异) 可知, 3 种土层深度有效锌含量的变异均为中等变异, 且随土层深度的增加变异系数逐渐变小, 其中 0~10 cm 土层土壤有效锌含量变异强度最大, 说明其有效锌含量受外界因素影响最大。

表 1 陕西鹦鹑沟小流域不同土层深度有效锌含量的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of SAZ at different soil depths in the Yingwugou watershed in Shaanxi

土层深度/cm Depth	平均值/(mg·kg ⁻¹) Mean	最小值/(mg·kg ⁻¹) Min	最大值/(mg·kg ⁻¹) Max	变异系数/% CV
0~10	1.24	0.19	5.53	63
10~20	0.76	0.05	3.08	56
20~40	0.75	0.28	3.97	41

2.2 不同土地利用类型土壤有效锌含量的分布特征

表 2 表明, 农地、林地、草地 3 种土地利用方式下土壤有效锌含量平均值分别为 0.80, 1.07, 0.77

mg/kg, 均高于陕南地区土壤有效锌的均值 (0.54 mg/kg)^[18]。185 份土样只有 16% 的样品有效锌含量低于该平均值。3 种土地利用方式下土壤有效锌含量平均值表现为林地>农地>草地, 这是因为林

地中有大量的动植物残体和发达的植物根系,促进了有效锌的形成^[14-15],故其有效锌含量较高。

农地、林地和草地有效锌含量平均值均高于有效锌极低水平的临界值(0.5 mg/kg)^[8],而低于土壤受锌污染的阈值(300 mg/kg)^[19]。根据“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”^[20]可知,土壤有效锌含量 ≤ 0.5 mg/kg,属于极低水平; $0.5<$ 土壤有效锌含量 ≤ 1.0 mg/kg,属于低水平; $1.0<$ 土壤有效锌含量 ≤ 2.0 mg/kg,属于中等水平; $2.0<$ 土壤有效锌含量 ≤ 5.0 mg/kg,属于高水平。本研究区土壤有效锌含量为 0.28~2.94

mg/kg,其中有效锌含量属于极低水平的农地、林地和草地分别占 10.71%,2.99%和 23.08%,含量属于低水平的分别占 72.26%,52.24%和 69.23%,含量属于中等水平的分别占 15.74%,34.33%和 7.7%,含量属于高水平的分别占 1.56%,10.45%和 0%。故研究区大部分土壤(超过 50%)有效锌含量处于较低水平。

表 2 还表明,农地、林地、草地的有效锌含量分别为 0.35~2.18,0.39~2.94,0.28~2.4 mg/kg,极差表现为林地>草地>农地。农地、林地、草地有效锌的变异系数分别为 41%,53% 和 57%,均属于中等变异,说明有效锌的分布离散程度较大。

表 2 陕西鹦鹉沟小流域不同土地类型有效锌含量的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of SAZ with different land use in the Yingwugou watershed in Shaanxi				
土地类型 Land type	平均值/(mg·kg ⁻¹) Mean	最小值/(mg·kg ⁻¹) Min	最大值/(mg·kg ⁻¹) Max	变异系数/% CV
农地 Farmland	0.80	0.35	2.18	41
林地 Woodland	1.07	0.39	2.94	53
草地 Grassland	0.77	0.28	2.40	57

2.3 土壤有效锌含量与地形因子的相关关系

2.3.1 不同土层深度下有效锌与地形因子的相关关系 有研究表明,坡度、坡向和海拔对土壤有效锌含量均有不同程度的影响^[21-22],因此本研究分析了以上 3 种地形因子与土壤有效锌的相关关系。从表 3 可以看出,0~10,10~20,20~40 cm 土层有效锌含量均与海拔呈显著或极显著负相关,相关系数分别为 -0.176 ($P<0.05$)、-0.330 ($P<0.01$),

-0.215 ($P<0.01$),其原因可能是随海拔的升高,气温降低,动植物的代谢受到影响,导致土壤有机质含量发生了变化,进而影响到土壤有效锌的含量,故二者之间显著相关^[15];仅 10~20 cm 土层有效锌含量与坡向呈显著负相关,3 个土层有效锌含量与坡度之间无显著的相关性,这可能是由于人类对土地的开垦及种植模式的变化消弱了坡度和坡向对有效锌含量的影响所致^[2]。

表 3 陕西鹦鹉沟小流域不同土层深度下土壤有效锌与地形因子的相关关系

Table 3 Pearson correlations between SAZ and topographic factors at different soil depths in the Yingwugou watershed in Shaanxi			
地形因子 Topographical factor	有效锌含量 Content of SAZ		
	0~10 cm 土层 0-10 cm soil layer	10~20 cm 土层 10-20 cm soil layer	20~40 cm 土层 20-40 cm soil layer
坡度 Slope	-0.035	-0.055	0.049
坡向 Aspect	-0.078	-0.158*	-0.134
海拔 Elevation	-0.176*	-0.215**	-0.330**

注: * 表示显著相关($P<0.05$); ** 表示极显著相关($P<0.01$)。下表同。
Note: * significant at $P<0.05$; ** significant at $P<0.01$. The same below.

2.3.2 不同土地利用类型土壤有效锌含量与地形因子的相关关系 为了更全面地分析有效锌在研究区域的空间分布特征,进一步分析了不同土地利用下土壤有效锌含量与地形因子的相关性,结果见表 4。从表 4 可以看出,农地有效锌含量与坡度、坡向和海拔呈现出极显著的负相关性,说明农地受地形因子的影响较大;林地和草地有效锌含量与坡度、坡向及海拔之间均无显著相关性,说明地形因子对林地和草地有效锌含量的影响较小。

根据研究区的实际地形,将坡度划分为 5 个等级,坡向划分为 3 个类型,海拔划分为 4 个等级,测算不同土地利用方式下不同坡度、坡向、海拔土壤有效锌含量的平均值,结果见表 5。从表 5 可以看出,农地土壤有效锌含量平均值随坡度和海拔的增大而减小;农地土壤有效锌的含量与坡向的相关关系表现为无坡向>阳坡=阴坡,说明在一定范围内随着光照强度和温度的升高土壤有效锌的含量随之增加。草地土壤有效锌含量平均值随着坡度的升高而

增大,随海拔的升高先增大后减小;土壤有效锌含量在坡向上表现为阴坡>阳坡>无坡向。林地土壤有效锌含量平均值随海拔的增大无明显变化,随坡度的增加总体上呈先升后降的趋势;土壤有效锌含量

平均值在坡向上表现为阴坡>无坡向>阳坡。因为林地和草地多分布在立地条件较差的高海拔和大坡度地区,故高海拔和大坡度地区的土壤有效锌含量相对较高。

表 4 陕西鹦鹉沟小流域不同土地类型土壤有效锌与地形因子的相关关系

Table 4 Pearson correlations between SAZ and topographic factors with different land use in the Yingwugou watershed of Danjiang River in Shaanxi

土地类型 Land type	地形因子 Topographical factor		
	坡度 Slope	坡向 Aspect	海拔 Elevation
农地 Farmland	-0.357**	-0.299**	-0.406**
林地 Woodland	0.220	0.020	-0.067
草地 Grassland	0.291	-0.096	0.014

表 5 陕西鹦鹉沟小流域不同土地类型在各地形因子下的土壤有效锌含量平均值

Table 5 Mean SAZ contents of different land use under different topographic factors in the Yingwugou watershed in Shaanxi

		mg/kg		
地形因子 Topographical factor		农地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland
坡度 Slope	≥0°~<3°	1.02	0.83	0.57
	≥3°~<8°	1.00	0.86	0.54
	≥8°~<15°	0.74	1.50	0.72
	≥15°~<25°	0.64	0.99	0.73
	≥25°	0.62	1.16	1.08
坡向 Aspect	阴坡 Shady slope	0.69	1.09	1.03
	阳坡 Sunny slope	0.69	1.04	0.71
	无坡向 No aspect	0.93	0.95	0.74
海拔 Elevation	<500 m	1.17	0.93	0.57
	≥500~<530 m	0.88	1.15	1.19
	≥530~<560 m	0.73	1.02	0.84
	≥560 m	0.73	0.90	0.90

2.4 土壤有效锌的空间分布特征

为了更直观地反映土壤有效锌的空间分布特征,对鹦鹉沟流域 3 个采样深度下土壤有效锌含量(SAZ)进行了 Kriging 插值,由于 Kriging 插值对呈正态分布的指标预测较好,故在进行地统计学前,需检验土壤有效锌含量是否满足正态分布。对试验

数据进行 K-S 检验,结果发现 3 个土层土壤有效锌含量的 P 值均小于 0.05,不服从正态分布。因此,对采样点数据进行常用对数转化(lg(SAZ)),转化后的分布曲线(图 2)经 K-S 检验 P 值均大于 0.05,满足正态分布的要求。

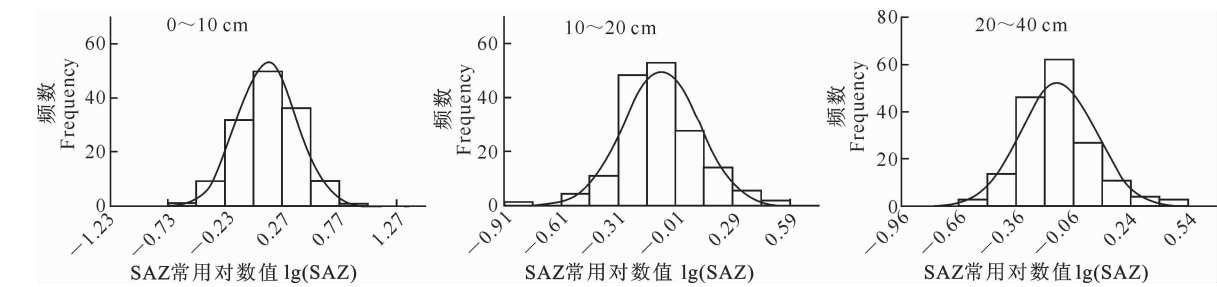


图 2 陕西鹦鹉沟小流域不同土层土壤有效锌含量(SAZ)经常用对数转化后的分布曲线

Fig. 2 Normal distribution curves of SAZ by logarithmic transformation at different depths in the Yingwugou watershed in Shaanxi

在 GS⁺中,对 3 个土层 lg(SAZ)进行半方差函数模拟,得到半方差函数模型及其参数,拟合度(R²)最高且残差平方和(RASS)最小的模型为最优

模型。由表 6 可知,0~10, 20~40 cm 土层土壤有效锌的最优模型为线性模型,其决定系数均为 0.83; 10~20 cm 土层土壤有效锌的最优模型为指数模

型,其决定系数为 0.74。此外,3 个模型的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

反映研究区域土壤有效锌含量的空间结构。

表 6 陕西鹦鹉沟小流域不同土层 lg(SAZ)的地统计学参数

Table 6 Geostatistics parameters of SAZ by logarithmic transformation at different soil depths in the Yingwugou watershed in Shaanxi

土层深度/cm Depth	模型 Model	拟合度 R^2	残差平方和 RASS
0~10	线性模型 Linear model	0.83	2.638×10^{-4}
10~20	指数模型 Exponential model	0.74	1.343×10^{-4}
20~40	线性模型 Linear model	0.83	4.045×10^{-5}

用最优模型进行插值后绘制 3 个土层土壤有效锌的空间分布图,结果见图 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趋势,且变化范围也逐渐缩小。0~10 cm 土层的有效锌含量最高;10~20 cm 土层的有效锌含量的分布范围明显比 0~10 cm 土层小,有效锌含量为 0.4~1.3 mg/kg;20~40 cm 土层的有效锌含量相对较低,有

效锌含量为 0.4~1.0 mg/kg。3 个土层下,土壤有效锌含量沿河流流向逐渐增加,整体呈东部低西部高的变化趋势。因为河流处于沟谷处,且由高海拔处流向低海拔处,雨水由陡坡或高海拔处流向缓坡或低海拔处,泥沙随之迁移,从而使有效锌沿水流方向富集。

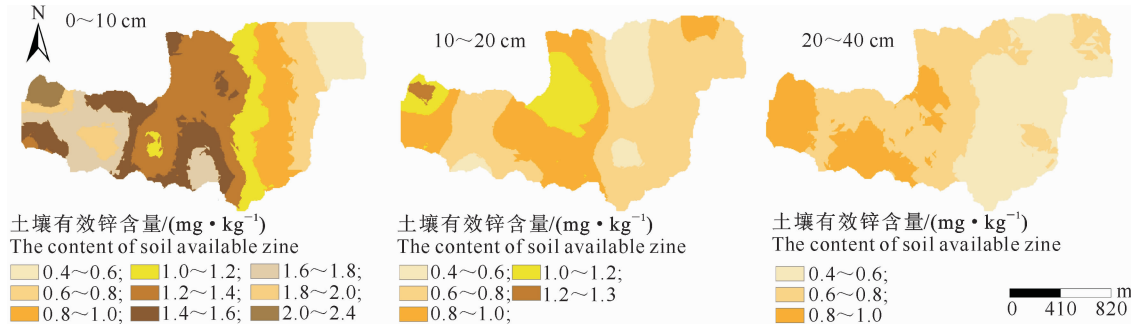


图 3 陕西鹦鹉沟小流域 3 个土层土壤有效锌含量的空间插值分布

Fig. 3 Spatial interpolation distribution of SAZ content at the three soil layers in the Yingwugou watershed in Shaanxi

3 结 论

1)研究区 0~10,10~20,20~40 cm 土层土壤有效锌含量的平均值分别为 1.24,0.76 和 0.75 mg/kg,可知土壤有效锌含量随土层深度的增加而逐渐减小。3 个土层有效锌含量的变异均为中等变异,变异系数随土层深度的增加逐渐减小。

2)农地、林地、草地 3 种土地利用方式下土壤有效锌含量均值均高于陕南地区的均值,采样点中有 16%的土壤在均值以下;农地、林地、草地土壤有效锌含量均值分别为 1.07,0.80 和 0.77 mg/kg,表现为林地>农地>草地,其中农地有效锌含量的变异系数最小。

3)0~10 cm 土层土壤有效锌含量与海拔呈现出显著相关性($P<0.05$),10~20 和 20~40 cm 土层土壤有效锌含量与海拔呈现极显著相关性($P<0.01$)。农地土壤有效锌含量与坡度、坡向和海拔均呈现出极显著的相关性($P<0.01$)。

4)研究区 3 个土层下,模拟 0~20 和 20~40 cm 土层土壤有效锌含量的最优模型为线性模型,模拟 10~20 cm 土层土壤有效锌含量的最优模型为指数模型。流域不同土层下土壤有效锌的空间分布呈带状格局,且随土层深度的增加有效锌含量及其变化范围也逐渐减小,沿水流方向逐渐增加,总体呈东部低西部高的趋势。

[参考文献]

[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] 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 G C, Li Z B, Li P, 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. (in Chinese)

[3] Xu G C, Li Z B, Li P, et al. Spatial variability of soil organic

- carbon in a typical watershed in the sou rce area of the Middle Dan River,China [J]. *Soil Research*,2013,51:41-49.
- [4] 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*,2012,36(16):4869-4980.
- Wang H L,Zhang H G,Qin L,et al. The characteristic of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,36(16):4869-4980. (in Chinese)
- [5] Lin Y P. Multivariate geostatistical methods to ideatify and map spatial variations of soil heavy metals [J]. *Environ Geol*, 2002,42:1-10.
- [6] 胡克林,张凤荣,吕盼忠,等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征 [J]. *环境科学学报*,2004,24(3):463-468.
- Hu K L,Zhang F R,Lü Y Z,et al. Spatial distribution of heavy metals in Daxing County, Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2004,24(3):463-468. (in Chinese)
- [7] Zhao Y F,Shi X Z,Huang B,et al. Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils of an instustry-based peri-urba area in Wuxi China [J]. *Pedosphere*,2007,17(1):44-51.
- [8] 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]. *土壤通报*,1991,28(3):317-326.
- Yu C Z,Peng L,Liu Y H. Distribution of trace elements in soil and fertilizer effect of loess area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,1991,28(3):317-326. (in Chinese)
- [9] 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 Z H. The background features and formation of chemical elemens of groundwater in thearea of the middle and lower beaches of the Yangtze River [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996,70(3):262-269. (in Chinese)
- [10] 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 H M,Zhang X C,Su S H. Available zinc content and related properties of main soil in the Loess Plateau [J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2008,27(3):898-902. (in Chinese)
- [11] 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 Z. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,1994,27(1):30-37. (in Chinese)
- [12] Hansel C M,Fendorf S. Characterization of Fe plaque and associated metals on the roots of mine-waste impacted aquatic plants [J]. *Environment Science and Technology*,2001,35: 3863-3868.
- [13] 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):125-131.
- Guo G H,Zhang H C. Spatial distribution and pollution assessment of Zn in urban soils of Yibin,Sichuan Province [J]. *Geographical Research*,2011,30(1):125-131. (in Chinese)
- [14] Wei X R,Hao M D,Shao M A,et al. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization [J]. *Soil Tillage Research*,2006,91: 120-130.
- [15] Mackowiak C L,Grossl P R,Bugbee B G. Beneficial effects of humic acid on micronutrient availability to wheat [J]. *Soil Science Society of America Journal*,2001,65:1744-1750.
- [16] Phillips I R. Copper,lead,eadmium, and zinc,orption by waterlogged and air-dry soil [J]. *J Soil Contamination*,1999,9 (3):343-364.
- [17] Nielson D R,Bouma J. Soil spatial variability [M]. Wageningen:PUDOC,1985:2-30.
- [18] 彭 琳,彭祥琳,余存祖,等. 陕西省土壤锌素状况及锌肥肥效初报 [J]. *陕西农业科学*,1980(5):14-16.
- Peng L,Peng X L,Yu C Z,et al. The soil zine condition and zinc fertilizer preliminary report for Shaanxi Province [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*,1980(5):14-16. (in Chinese)
- [19] Diza R M,Bath E. Development of metal tolerance in soil bacterial communities exposed to experimentally increased metal levels [J]. *Appl Environ Microbiol*,1996,62:2970-2977.
- [20] 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 H L,Yang F,Huang D,et al. Effect and evaluation of soil trace elements after grassland converted intocropland in agropasturage ecotone of northern China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2012,28(7): 155-160. (in Chinese)
- [21] 吴彩霞,傅 华,裴世芳,等. 不同草地类型土壤有效态微量元素含量特征 [J]. *干旱区研究*,2008,25(1):137-144.
- Wu C X,Fu H,Pei S F,et al. Study on the contents of available trace elements in different grassland soils on the western slope of the Helan Mountain [J]. *Arid Zone Researcr*,2008, 25(1):137-144. (in Chinese)
- [22] 张晓霞,李占斌,李 鹏,等. 黄土高原林地土壤微量元素分布和迁移特征 [J]. *应用基础与工程科学学报*,2011(S1):161-169.
- Zhang X X,Li Z B,Li P,et al. Distribution and migration characteristics of woodland trace elements in Loess Plateau [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*,2011(S1):161-169. (in Chinese)