

黄土沟壑区小流域不同地形下土壤微量元素分布特征

魏孝荣^{1, 2}, 邵明安^{1, 2*}

(1. 西北农林科技大学, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要:研究了黄土沟壑区小流域塬面、坡地、梯田和沟道土壤微量元素的剖面分布特征,以揭示不同地形条件下微量元素的有效性及其地球化学特性。结果表明,不同土层土壤全量微量元素的变异系数均小于15%,为小变异土壤性质,有效态和吸附态铁和锰的变异系数均高于36%,为高度变异土壤性质;有效态和吸附态锌和铜属于中到高度变异,全量铁、锰和铜以沟道土壤较高,全锌、有效态和吸附态微量元素含量以塬面土壤较高。不同形态微量元素的剖面分布趋势取决于地形条件。不同地形下成土过程及不同地形条件所对应的土地利用方式造成了全量微量元素的差异,而土壤有机质含量的差异是不同地形条件下有效态和吸附态微量元素剖面分布特征不同的主要原因。

关键词:黄土沟壑区;地形条件;微量元素;剖面分布

中图分类号:X144 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2009)09-2741-06

Distribution of Micronutrients in Soils as Affected by Landforms in a Loessial Gully Watershed

WEI Xiao-rong^{1, 2}, SHAO Ming-an^{1, 2}

(1. Northwest Science and Technology University of Agriculture & Forestry, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Landform is the most important environmental factor influencing the distribution of soil micronutrients in the Loess Plateau and the well understanding of the effects is an important prerequisite for the estimation of soil micronutrients' availability and geochemistry in the Loess Plateau. This study was therefore conducted in a watershed of the loessial gully region to reveal the effects of landforms on profile distribution of soil micronutrients. Soil samples from 37 profiles were collected and total, available and adsorbed iron, manganese, zinc and copper were determined. The results showed that total micronutrients varied slightly with covariance coefficients lower than 15%, while available and adsorbed micronutrients varied greatly in the studied area. Total contents of iron, manganese and copper were higher in gully bottom soils, while total zinc, available and adsorbed micronutrients were higher in plateau land soils compared with soils in other landforms. The soil-forming process and land use conditions in each landform are the major reasons for the differences in soil total micronutrients. Landform induced changes of soil organic matter is the major factor controlling profile distribution of available and adsorbed micronutrients.

Key words: loessial gully region; landform; soil micronutrients; profile distribution

土壤是植物生长所需微量元素的主要来源,全世界土壤因微量元素供应不足造成的植物缺素现象时常发生^[1~3]。我国土壤除了铜的供给比较充足,铁、锰和锌的供给在不同区域不同土壤都很不平衡。在一些地区土壤中,一种或几种微量元素的缺乏现象相当普遍^[2~4]。根据余存祖等^[5]研究,黄土高原地区有11%的土壤缺铁,48%的土壤缺锰,56%的土壤缺锌,21%的土壤缺铜,土壤微量元素供应不足已经影响到了该区的植物生长。但是该区土壤微量元素全量并不低^[5,6],因此其有效性的变化是微量元素供应不足的主要原因。

有效态微量元素是土壤中能够被植物吸收利用的那部分微量元素,它在土壤中的含量往往较低,与全量微量元素含量的关系较弱,常用DTPA浸提法

来测定^[7]。土壤吸附态微量元素是在静电引力作用下吸附在粘粒、有机质、氧化物等表面的微量元素。通过共价键在粘粒表面被专性吸附的微量元素,这部分微量元素是土壤有效态微量元素的潜在来源^[1,3,4],常用 $0.43 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 浸提法测定^[8]。结合微量元素全量、有效态和吸附态含量不但可以说明微量元素的有效性变化,而且可以指示微量元素的地球化学特征^[4, 9]。

黄土高原地区地形复杂,地形条件不但支配着

收稿日期:2008-10-26;修订日期:2008-12-07

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB106803);国家自然科学基金项目(40801111);西部之光西部博士项目

作者简介:魏孝荣(1978~),男,博士,主要研究方向为土壤学, E-mail: xrwei78@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

降雨在地表的再分布及在土壤剖面的运行过程,而且显著影响着土壤物质循环等过程,从而造成土壤理化性质的差异^[10~12],并使微量元素的有效性发生变化^[13~15].本实验在位于黄土高原沟壑区的王东沟小流域选择了塬面、梯田、坡地和沟道 4 种典型地形条件,分析了不同地形条件下土壤微量元素的剖面分布特征,以期为研究黄土高原地区土壤微量元素的分布特征及其有效性提供依据,并为研究该区微量元素的环境地球化学特征提供基础资料.

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在地处黄土高原南部的王东沟小流域进行.王东沟小流域位于陕西省长武县境内,东经 107°40′30″~107°42′30″,北纬 35°12′~35°16′,海拔 1 200 m,属典型的黄土高原沟壑区,流域总面积 8.3 km².该流域土壤母质为中壤质马兰黄土,气候属暖温带半湿润大陆型气候,多年平均气温 9.1℃,多年平均无霜期 171 d,≥0℃活动积温 3 866℃,≥10℃活动积温 3 029℃,年均降雨量为 584.1 mm,降水变率大,年内季节分布不均,主要集中在 7~9 月份.

1.2 样品采集与分析

于 2005 年 7 月按照 1:7 500 比例尺的王东沟流

域地形图,在王东沟流域不同地形条件下采集 37 个土壤剖面样品进行土壤微量元素分布特征研究.在每个采样点分别采集 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层土壤样品,采 3 次重复组成混合土样.土壤样品自然风干,分别处理通过 0.25 mm 和 1.0 mm 筛孔以供测定.

土壤全量、有效态和吸附态微量元素含量的测定分别用王水消化^[16]、DTPA 浸提^[7]和 0.43 mol·L⁻¹ HNO₃ 浸提^[8],消化液和浸出液中微量元素含量用原子吸收法测定.

2 结果与讨论

2.1 小流域范围土壤微量元素的剖面分布特征

由表 1 结果可以看出,土壤微量元素全量及吸附态含量在不同土层之间差异不大,有效态铁、锰、锌含量在表层土壤中的含量稍高于底层土壤,有效铜在不同土层之间变化也不大,这是因为土壤全量和吸附态微量元素含量在土壤中比较稳定,不但在不同土层之间变异较小,而且其平均含量随土层差异也较小.另一方面,表 1 中的数据为各种地形条件下土壤微量元素的平均含量,只能反映小流域土壤微量元素含量在剖面的整体分布趋势,不能体现出地形条件对剖面分布的影响.

表 1 王东沟小流域土壤微量元素的剖面分布特征¹⁾

Table 1 Profile distribution of soil micronutrients in Wangdonggou watershed

土层厚度 /cm	参数	全量				有效态含量				吸附态含量			
		Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn	Cu
0~20	均值	27.1	574	65.7	24.0	3.46	3.72	0.20	0.70	351	234	6.75	5.62
	标准差	1.72	31.0	3.42	1.99	1.47	1.76	0.19	0.16	135	66.7	2.54	1.69
	C.V./%	6.36	5.39	5.21	8.27	42.4	47.2	91.3	22.5	38.4	28.5	37.7	30.0
20~40	均值	26.6	573	64.9	24.1	3.06	3.26	0.10	0.70	344	205	6.25	5.52
	标准差	2.80	35.9	3.17	2.42	1.24	1.44	0.13	0.16	153	64.5	2.42	1.71
	C.V./%	10.5	6.26	4.88	10.1	40.4	44.1	130	22.4	44.5	31.4	38.7	31.0
40~60	均值	27.4	574	65.3	24.1	3.11	3.26	0.06	0.72	358	183	6.24	5.55
	标准差	1.95	41.1	3.92	2.50	1.22	1.43	0.04	0.22	168	52.3	2.09	1.69
	C.V./%	7.12	7.16	6.01	10.4	39.1	43.9	76.5	30.6	46.9	28.5	33.4	30.4
60~80	均值	27.2	582	660	24.5	3.27	3.29	0.05	0.73	375	166	6.22	5.91
	标准差	1.60	54.6	5.69	2.99	1.32	1.69	0.05	0.28	225	50.7	2.82	2.39
	C.V./%	5.89	9.39	8.63	12.2	40.5	51.5	102	38.1	60.0	30.5	45.3	40.4

1) 全铁的单位为 g·kg⁻¹,其它形态微量元素的单位为 mg·kg⁻¹

在土壤科学研究中,可根据土壤性质的变异系数对其变异程度进行分类:变异系数在 0~15%之间的为小变异,16%~35%之间的为中等变异,>36%的为高度变异^[17].不同土层土壤全量微量元素的变异系数均小于 15%,为小变异土壤性质;有效态和吸附态微量元素的变化情况则因土层和元素种类而异.4 个土层土壤有效铁、锰和锌含量的变异系

数均高于 36%,为高度变异土壤性质;土壤有效铜在 0~60 cm 土层的变异系数为 22%~31%,属中等变异,在 60~80 cm 土层的变异系数为 38%,属高度变异;吸附态铁和锰在 4 个土层的变异系数为 38%~60%和 28%~32%,分别属于高度和中度变异,吸附态锌在 40~60 cm 土层为中等变异,在其它土层为高度变异,吸附态铜在 0~60 cm 土层为中等变

异,在 60~80 cm 土层为高度变异.流域范围内土壤微量元素剖面分布的变异主要由地形条件引起的,因此需要对不同地形下微量元素的剖面分布进行分析,以进一步揭示小流域土壤微量元素剖面分布与地形条件的关系.

2.2 不同地形条件下全量微量元素的剖面分布

土壤全量微量元素的剖面分布主要与土壤对母质微量元素含量的继承有关,而土壤对母质微量元素含量的继承更多地体现在成土过程中土壤微量元素的变化,这种变化与微量元素在土壤剖面的淋溶迁移过程和强度有关.用表土层和底土层微量元素含量的比值可以表征微量元素在土壤剖面的淋溶迁移特征^[9].该比值 < 1,表明表层土壤微量元素向底层土壤淋溶迁移,该比值 > 1 则表明底层微量元素在生物作用下向表层土壤富集,或者表层土壤有外源微量元素加入,前者是自然条件下生物作用的结果,后者是人为干扰的结果.不同地形条件下由于土壤水分状况不同,成土过程中微量元素的淋溶迁移强度也不同,从而造成微量元素剖面分布上的差异.微量元素在土壤中的迁移分布主要受其化学性质制约,不同微量元素在土壤中的化学行为不同,其在土壤剖面的分布也不同.

同一地形条件下不同微量元素的剖面分布趋势差异较大,而且同一元素的含量也因地形条件不同而不同(图 1).塬面土壤铁、锰、锌的含量在 0~20 cm 土层较高,20~40 cm 土层较低,而且在 20~80 cm 土层内随土层深度的增加逐渐增加,土壤铜的含量在 0~80 cm 土层内逐渐降低.这表明塬面土壤在成土过程中微量元素在土壤剖面中的淋溶迁移和累积明显(表 2),但是由于塬面土壤基本为农田和果园,肥料(有机肥和化肥)用量比较大,伴随着肥料的施用,表层土壤中微量元素得到补充,其含量高于 20~40 cm 土层土壤.梯田土壤 4 种微量元素的含量均随土层深度的增加而降低,这可能与梯田开垦前后土壤层次的变化及人为施肥有关.梯田开垦后为了提高土壤肥力,肥料投入量很大,而随肥料进入土壤中的微量元素便累积在表层土壤中,其含量远远高于底层土壤;另一方面,梯田开垦后的表层土壤可能是开垦前的底层土壤,开垦前表层土壤中的微量元素在长期的成土过程中向下淋溶迁移并可能在此土层累积,由此土层向下,土层越深,累积的微量元素便越少,其土壤中的含量因此呈现出随土层加深而降低的趋势.坡地土壤中 铁和锌在表层土壤(0~20 cm)含量低于底层土壤(20~80 cm),而且在底层

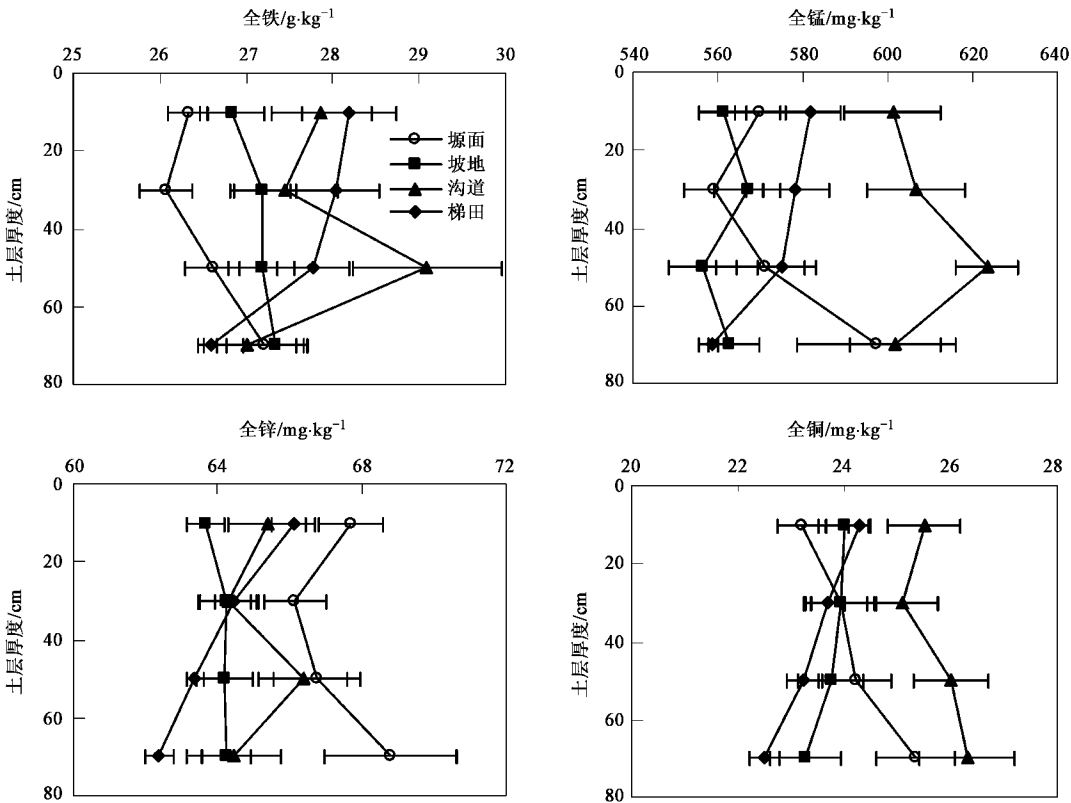


图 1 不同地形条件下土壤全量微量元素的剖面分布

Fig.1 Profile distribution of total micronutrients as affected by landforms

土壤的含量随土层加深略有增加. 这表明坡地土壤中
铁和锌也发生过向下淋溶迁移和累积, 但坡面降
雨侵蚀过程中土壤铁和锌随侵蚀泥沙流失可能是表
层土壤铁和锌含量低于深层土壤的主要原因. 坡地
土壤剖面中锰和铜的含量变化不大, 表明发生在坡
地的侵蚀过程或淋溶过程对土壤锰和铜的剖面分布
影响不显著. 沟道土壤水分条件较好, 发生在土壤剖
面中的淋溶作用比较强烈, 不同元素在特定土层表
现出比较明显的淋溶迁移和累积特征. 此外, 表层土
壤不断接受着土壤侵蚀过程中在沟道沉积的侵蚀泥
沙及其中的微量元素, 虽然沉积在沟道的侵蚀泥沙
量不多, 但由于这些泥沙全是细颗粒黏粒, 其中微
量元素含量比较高, 所以此过程对沟道土壤剖面微

元素的分布特征也产生影响. 微量元素种类不同, 其
在沟道土壤剖面中富集的深度也不同, 铁、锰、锌主
要迁移到 40 ~ 60 cm 土层并在此层累积, 铜则迁移
到 40 ~ 80 cm 土层并累积. 同一微量元素在各种地
形条件下的含量顺序差异显著, 而且其含量顺序还
与元素种类有关. 坡地土壤微量元素含量较低, 而沟
道土壤剖面的铁、锰、铜含量均高于其它 3 种地形条
件, 这进一步说明不同地形条件下土壤剖面微量元
素的分布特征主要受降雨侵蚀过程和侵蚀泥沙在沟
道的沉积过程影响. 另外, 塬面土壤剖面铁的含量远
远低于其他地形条件, 锌的含量却显著高于其他地
形条件, 这可能与塬面土壤成土母质中铁和锌的含
量较高有关.

表 2 不同土层微量元素含量的比值

土层/cm	塬面				坡地				沟道				梯田			
	Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn	Cu
0 ~ 20/60 ~ 80	0.97	0.95	0.98	0.92	0.98	1.00	0.99	1.03	1.03	1.00	1.01	0.97	1.06	1.04	1.06	1.08
20 ~ 40/60 ~ 80	0.96	0.94	0.96	0.94	1.00	1.01	1.00	1.03	1.02	1.01	1.00	0.95	1.05	1.04	1.03	1.05
40 ~ 60/60 ~ 80	0.98	0.96	0.97	0.96	0.99	0.99	1.00	1.02	1.08	1.04	1.03	0.99	1.04	1.03	1.02	1.03

2.3 不同地形条件下有效态微量元素的剖面分布

土壤中有效态微量元素是指对植物有效或能被
植物吸收利用的那部分微量元素, 其含量受多种因

素的综合影响. 塬面土壤的有效态微量元素含量最
高, 沟道土壤含量最低, 而且 4 种地形条件下均以有
效铁和有效锰含量较高, 有效锌含量最低(图 2). 土

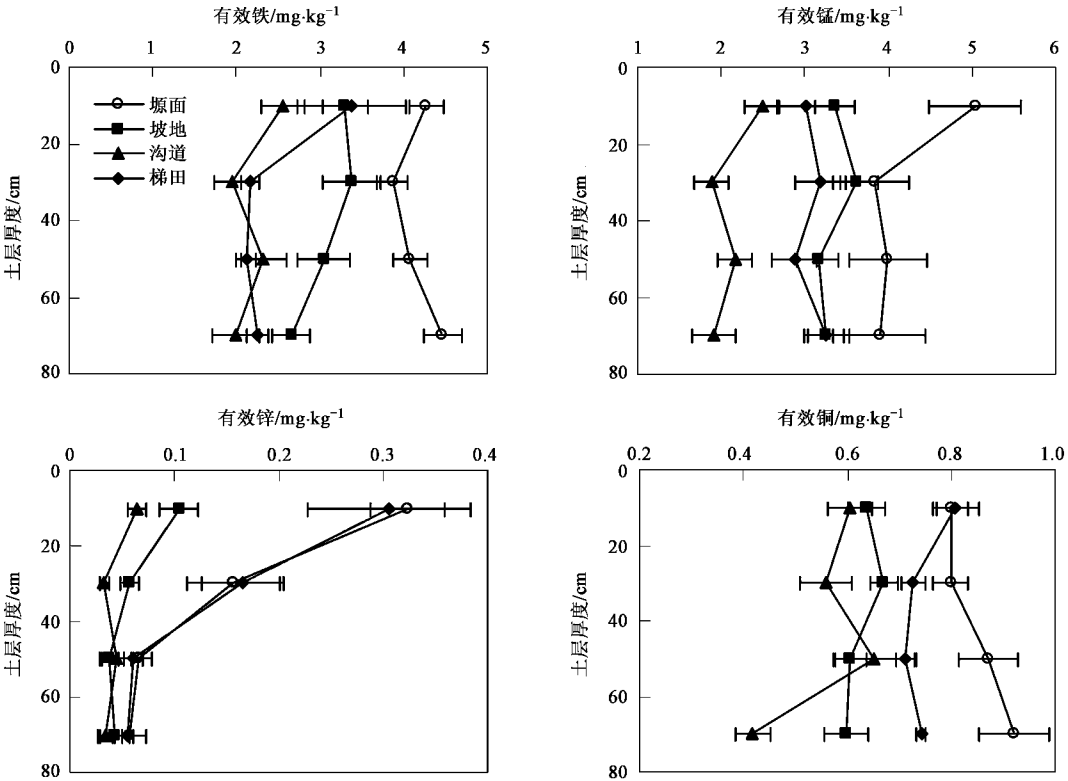


图 2 不同地形条件下土壤有效态微量元素的剖面分布

Fig.2 Profile distribution of available micronutrients as affected by landforms

壤有效铁、锰、铜含量随土层深度变化不大,不同地形条件下有效铁和有效锰的含量顺序为塬面>坡地>梯田>沟道,而有效铜的含量顺序为塬面>梯田>坡地>沟道.土壤有效锌含量均随土层深度增加逐渐降低,其在坡地和沟道土壤的含量较低,随土层加深降低不多;在梯田和塬面土壤含量较高,随土层加深降低幅度较大.

高的土壤有机质能够显著提高微量元素的有效性^[13,18],在一定的有机质含量范围内二者之间有着显著的正相关关系,因此不同地形条件下土壤有效态微量元素的剖面分布特征主要受有机质含量差异的影响.本研究中土壤有机质与有效铁、锰、锌和铜的相关系数分别为0.421、0.487、0.561和0.529,均达到 $p<0.001$ 显著水平($n=141$).塬面土壤有机质含量较高(图3),其有效态微量元素的含量也较高,沟道土壤有机质含量较低,其有效态微量元素的含量也较低.土壤有效铁和有效锰的含量还与土壤环境的氧化还原状况有关.在黄土高原地区,深层土壤氧化还原电位较低,有利于铁锰氧化物的还原及释放,有效态铁和锰的含量有所增加;上层土壤常处于氧化状况,土壤中的铁和锰多以氧化物的形态存在,但上层土壤有机质含量高,可以促进铁和锰向有效态释放,土壤有效铁和锰因为氧化而降低的程度又得到遏制.因此在土壤氧化还原状况及有机质的共同作用下,土壤有效铁和有效锰的含量随土层深度变化不显著.土壤有效锌与有机质之间的关系单一,

所以剖面分布趋势与有机质的剖面分布极为相似.土壤有效铜与有机质的关系受有机质含量的影响,在有机质含量较低时随有机质增加而增加,在有机质较高时则随有机质增加逐渐降低^[19,20],这就解释了土壤有效铜在剖面上随土层深度变化不大的分布特征.

2.4 不同地形条件下吸附态微量元素的剖面分布

不同地形条件下土壤吸附态微量元素差异很大,基本上表现为塬面>梯田>坡地>沟道的趋势,而且同一地形下以吸附态铁含量最高,吸附态铜含量最低(图4).吸附态锰和锌在土壤剖面逐渐降低,吸附态铁和铜在土壤剖面变化不大.土壤吸附态微量元素含量的剖面分布与土壤有机质含量剖面分布趋势相似,表明其剖面分布除受成土过程影响外,还受土壤中有机质影响,这也可通过吸附态微量元素与有机质之间极显著的正相关关系(有机质与土壤吸附态铁、锰、锌和铜的相关系数分别为0.545、0.547、0.389和0.759,均达到 $p<0.001$ 显著水平, $n=141$)来说明.此外,本研究中土壤微量元素吸附态含量与有效态含量极显著正相关(吸附态和有效态铁、锰、锌和铜之间的相关系数分别为0.538、0.544、0.507和0.788,均达到 $p<0.001$ 显著水平, $n=141$),进一步表明吸附态微量元素是有效态微量元素的潜在来源.

3 结论

- (1)黄土沟壑区小流域土壤全量微量元素为小变异土壤性质;有效态和吸附态微量元素的变异情况则因土层和元素种类而异,但其变异程度已经达到中等或高度变异程度.
- (2)土壤全量微量元素的剖面分布因地形条件差异很大,全量铁、锰和铜以沟道土壤较高,全锌含量以塬面土壤较高.不同地形下成土过程及不同地形条件所对应的土地利用方式造成了全量微量元素的差异.
- (3)有效态和吸附态微量元素在塬面土壤含量最高,沟道土壤含量最低.有效铁、锰、铜和吸附态铁、铜的含量随土层深度变化不大,有效锌和吸附态锰、锌的含量随土层深度增加逐渐降低.不同地形条件下土壤有效态和吸附态微量元素的分布特征是由土壤有机质的差异引起的.

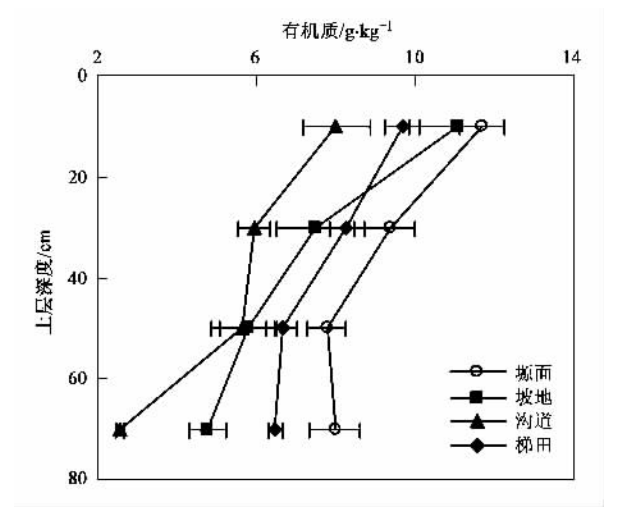


图3 不同地形条件下土壤有机质的剖面分布
Fig.3 Profile distribution of soil organic matter as affected by landforms

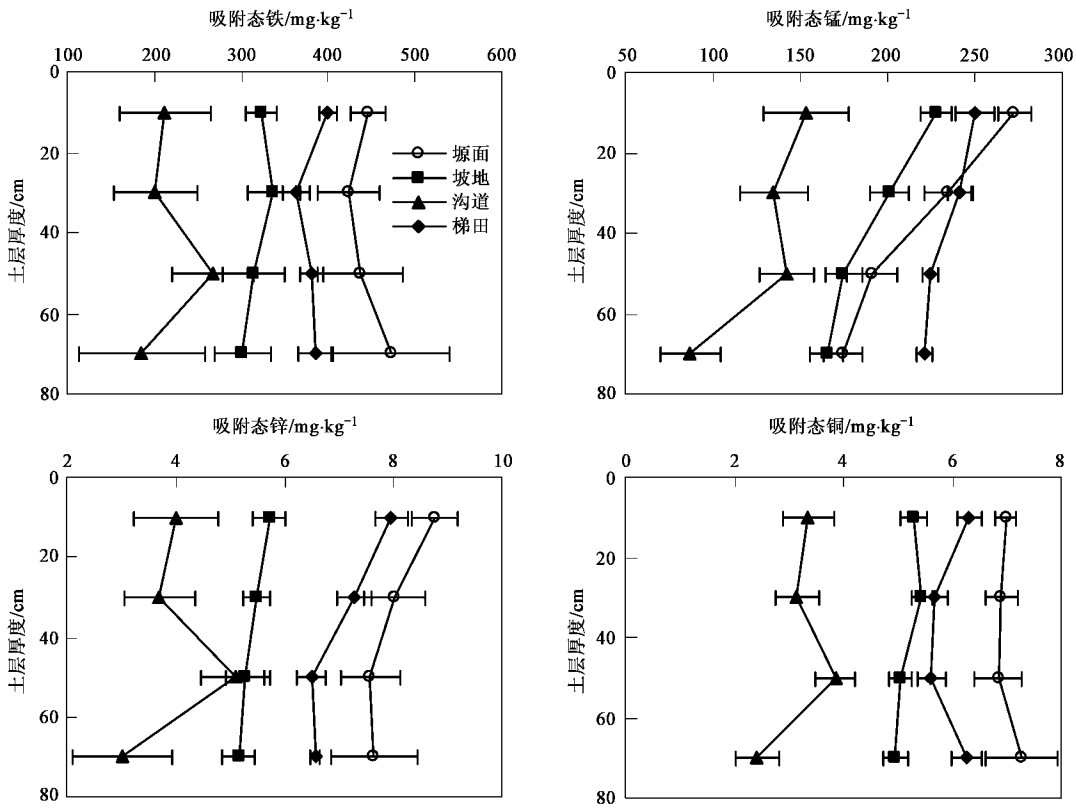


图 4 不同地形条件下土壤吸附态微量元素的剖面分布

Fig.4 Profile distribution of adsorbed micronutrients as affected by landforms

参考文献:

[1] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 336-544.

[2] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 517-536.

[3] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 370-449.

[4] 刑光熹, 朱建国. 土壤微量元素和稀土元素化学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 1-72.

[5] 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.

[6] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19.

[7] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper [J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, 42: 421-428.

[8] Tipping E, Rieuwerts J, Pan G, et al. The solid-solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales [J]. Environmental Pollution, 2003, 125: 213-225.

[9] 王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 1-41.

[10] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 74-79.

[11] 刘秀娣, 李继云. 土壤有效态微量元素含量与不同地貌单元关系的研究——以河南省新乡地区卫辉市和辉县市为例[J]. 环境科学, 1994, 15(5): 19-22.

[12] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域不同地形下土壤性质分布特征[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 946-953.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] ISO, Soil quality, Extraction of Trace Elements Soluble in Aqua Regia [S]. ISO 11466, 1995.

[17] Nielson D R, Bouma J. Soil Spatial Variability [M]. Wageningen: Purdoc, 1984. 166-193.

[18] 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.

[19] Hodgson J F, Lindsay W L, Trier Weiler J F. Micronutrient cation complexing in soil solution. II. Complexing of zinc and copper in displaced solutions from calcareous soils [J]. Soil Science Society of America Proceeding, 1966, 30: 723-726.

[20] Stevenson F J, Arda Kani M S. Organic matter reactions involving micronutrients in soils [A]. In: Mortvedt J J, Giordano P M, Lindsay W L. Micronutrients in Agriculture [C]. Madison, Wis, USA: Soil Science Society of America, 1972. 79-114.