

# 黄土高原主要土壤锌有效性及其影响因素

刘合满<sup>1</sup>, 张兴昌<sup>1,2</sup>, 苏少华<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 通过测定黄土高原不同区域、不同类型土壤全锌和有效锌含量,研究了黄土高原土壤锌含量及影响有效锌的因素。结果表明,供试土壤全锌主要分布在 50~100 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,有效锌含量较低,其中 20.69%在临界值(0.5 mg·kg<sup>-1</sup>)之下,37.93%为低(0.5~1.0 mg·kg<sup>-1</sup>)水平。用直线、幂函数和指数函数回归方程对影响有效锌的主要土壤因素进行回归拟合。发现土壤有效锌与全锌、全氮、全磷、有机质呈显著正相关,与土壤 pH 值呈显著负相关;幂函数可以较好地拟合有效锌与土壤全氮、有机质的相关关系,有效锌与全锌、全磷、pH 值宜用指数函数表示其相关性。通径分析表明土壤性质对有效锌的直接作用系数大小次序为全氮>全锌>pH>全磷,土壤全氮对锌有效性的直接作用最明显。

**关键词:** 回归分析;有效锌;有机质;土壤 pH;全氮;全磷

**中图分类号:** X53      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-2043(2008)03-0898-05

## Available Zinc Content and Related Properties of Main Soil in the Loess Plateau

LIU He-man<sup>1</sup>, ZHANG Xing-chang<sup>1,2</sup>, SU Shao-hua<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming in the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Total soil zinc, available zinc and other soil properties were measured to determine their distribution and to identify factors affecting their variability in different regions of the Loess Plateau. Results showed that total soil zinc was mostly within the range 50~100 mg·kg<sup>-1</sup>. For available zinc, 20.7% of the soil samples was lower than the critical value (0.5 mg·kg<sup>-1</sup>) and 37.9% beneath the low level (0.5~1 mg·kg<sup>-1</sup>). Power functions, linear and exponential regression equations were established to study the relationship between available zinc with other soil properties. For the Loess Plateau soils, soil available zinc was positively correlated with total zinc, total nitrogen, total phosphorus, and organic matter. A significant negative correlation existed with soil pH. Power functions fitted better between available zinc and total nitrogen or soil organic matter. The regression equations were  $\lg Y = 0.143\ 3 + 0.677\ 9\ \lg X$  ( $r = 0.694\ 8$ ) and  $\lg Y = 0.965\ 6 + 0.795\ 9\ \lg X$  ( $r = 0.774\ 5$ ), respectively. The relationships between soil available zinc and total zinc, total phosphorus and pH could be expressed by exponential functions. The regression equations were  $\lg Y = -1.006\ 1 + 0.012\ 6X$  ( $r = 0.654\ 9$ ),  $\lg Y = -0.534\ 8 + 0.086X$  ( $r = 0.480\ 7$ ),  $\lg Y = 5.021\ 4 - 0.607\ 3X$  ( $r = -0.583\ 4$ ), respectively. The results of path analysis indicated that the direct acting coefficient of soil chemical and physical factors on soil available zinc was in the following order: total nitrogen>total zinc>pH>total phosphorus. N-direct path coefficient was biggest and had the greatest direct effect on the soil available zinc.

**Keywords:** regression analysis; available zinc; organic matter; soil pH; total nitrogen; total phosphorus

土壤锌含量和有效性受到土壤母质、pH 值、有机质含量及其他共存金属元素等因素的影响。对于影响

土壤锌有效性因素的研究较多,Curtin 等<sup>[1]</sup>研究表明 pH 增加一个单位,土壤溶液锌离子浓度降低 4~10 倍,高 pH-H<sub>2</sub>O 明显降低土壤溶液中锌浓度,其与土壤溶液锌的负相关性达到极显著水平<sup>[2]</sup>;杨丽娟等<sup>[3]</sup>研究表明,施磷对土壤有效锌含量影响不明显;张淑香<sup>[4]</sup>研究得出施磷可以增加土壤有效锌、锰含量;Atanu Basak 等<sup>[5]</sup>研究供应磷对 DTPA 可提取态锌影响结果不一致;富含有机质的土壤,有效态锌含量也高<sup>[6]</sup>;施

收稿日期:2007-09-23

基金项目:教育部科研创新团队支持计划;国家科技支撑计划 (2006BAD09B06)

作者简介:刘合满(1979—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事黄土高原土壤重金属污染研究。E-mail:liuh-m@163.com

通讯作者:张兴昌 E-mail:zhangxc@ms.iswc.ac.cn.

氮明显提高土壤有效锌含量<sup>[7]</sup>。但对于黄土高原影响土壤锌有效性的因素及其规律研究较少。本文选取黄土高原不同区域、不同类型土壤对全锌、有效锌及土壤基本性质等进行测定,旨在分析黄土高原土壤锌含量及影响锌有效性的因素,为合理改善土壤性质、提高土壤锌有效性和锌肥的合理施用提供依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 土样采集

土壤样品分别采自甘肃天水、武山、陇西、兰州、宁夏固原、上黄村、青铜峡、包头阴山、东胜、陕西神木、榆林、绥德、宝鸡等地。在各采样区选择具有代表性的、无污染的荒坡作为采样点,每个采样点以半径 100 m 范围为采样单元,采用 5 点取样法采集表层(0~20 cm)混合土壤样品。共采集 29 个土壤样品,基本性质如表 1 所示。

## 1.2 土壤样品分析

所有土壤样品设置 3 个重复测定土壤基本性质和全锌、有效锌含量。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法,全氮采用凯氏定氮仪测定,全磷用酸溶钼锑抗比色法,全锌采用混酸(HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>-HF)消解,有效锌采用 DTPA 浸提液(pH=7.3,1:2 土液比),室温振荡 2 h,原子吸收法测定。

## 1.3 数据处理

回归分析和通径分析采用 DPS(DPS V7.55 版)统计软件进行。

# 2 结果与分析

## 2.1 黄土高原土壤锌含量及有效性

我国土壤全锌含量在 3~709 mg·kg<sup>-1</sup>,平均为 100 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>。黄土高原区土壤全锌含量为 20~135 mg·kg<sup>-1</sup>,平均为 69.1 mg·kg<sup>-1</sup>,低于我国土壤平均含量(100 mg·kg<sup>-1</sup>),有效锌为 0.06~2.97 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[9]</sup>。由图 1 土壤全锌和有效锌的含量分布情况可知,供试黄土高原土壤全锌主要分布在 50~100 mg·kg<sup>-1</sup> 范围内,即高于世界平均水平而低于我国平均水平;有 2 个点位于世界平均水平之下,占总样的 6.90%,有 89.66%位于 50~100 mg·kg<sup>-1</sup> 范围内,说明供试土壤全锌含量主要处于中等水平。从有效锌的分布图上可以看出,有效锌绝大部分在临界水平之上(0.5 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[10]</sup>,有 20.69%位于临界水平之下,37.93%含量在低范围内,31.03%为含量中等,从而说明黄土高原土壤有效锌含量比较低。

在供试黄土高原土壤中,土壤全锌范围为:25.85~105 mg·kg<sup>-1</sup> 最高含量与最低含量之间相差 4 倍,供试样本全锌含量变异系数为 20.89%,分布相对集中。有效锌含量为:0.28~3.50 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为 1.096 mg·kg<sup>-1</sup>,较余存祖<sup>[10]</sup>研究的结果高,可能与土壤取样的区域和土壤矿物质自然转化等因素有关。样本有效锌变异系数为:71.16%,数据分布离散,变异较大,说明土壤锌有效性受诸多因素的影响。

## 2.2 影响土壤有效锌的因素分析

### 2.2.1 土壤全锌与有效锌的关系

表 1 土壤主要性质  
Table 1 Main properties of the soils

| 采样点 | 土壤类型 | 全锌     | 有效锌  | 有机质   | pH值  | 采样点 | 土壤类型 | 全锌    | 有效锌  | 有机质   | pH值  |
|-----|------|--------|------|-------|------|-----|------|-------|------|-------|------|
| 安塞  | 黄绵土  | 68.03  | 0.61 | 9.12  | 8.40 | 固原  | 灰褐土  | 76.00 | 0.53 | 6.10  | 8.35 |
| 洛川  | 黑垆土  | 84.70  | 0.80 | 7.01  | 8.44 | 青铜峡 | 灰钙土  | 79.68 | 0.73 | 13.03 | 8.19 |
| 米脂  | 硬黄土  | 63.18  | 0.28 | 2.93  | 8.85 | 阴山  | 草甸土  | 66.65 | 1.63 | 14.51 | 8.40 |
| 杨凌  | 塬土   | 71.83  | 1.37 | 15.58 | 8.23 | 包头  | 灌淤土  | 86.95 | 0.97 | 16.64 | 8.25 |
| 榆林  | 风沙土  | 25.85  | 0.23 | 2.01  | 8.64 | 东胜  | 新积土  | 77.38 | 0.95 | 5.19  | 8.09 |
| 天水  | 黄绵土  | 105.00 | 3.50 | 14.46 | 8.40 | 东胜  | 栗钙土  | 42.00 | 0.31 | 1.95  | 8.78 |
| 武山  | 黄绵土  | 89.20  | 0.49 | 8.94  | 8.89 | 神木  | 绵砂土  | 57.25 | 0.75 | 5.81  | 8.50 |
| 武山  | 黄绵土  | 86.08  | 0.95 | 8.20  | 8.87 | 榆林  | 黄绵土  | 72.7  | 0.72 | 4.46  | 8.30 |
| 武山  | 红土   | 83.83  | 0.47 | 6.77  | 8.40 | 绥德  | 黄绵土  | 67.00 | 0.38 | 2.57  | 8.61 |
| 陇西  | 黄绵土  | 82.43  | 1.32 | 17.23 | 8.35 | 绥德  | 黄绵土  | 82.08 | 2.35 | 6.98  | 8.24 |
| 兰州  | 黄绵土  | 74.63  | 0.80 | 5.24  | 8.47 | 宝鸡  | 褐土   | 89.73 | 3.07 | 33.75 | 7.92 |
| 兰州  | 灰褐土  | 73.75  | 1.08 | 18.16 | 8.33 | 宝鸡  | 褐土   | 99.95 | 1.49 | 15.77 | 7.97 |
| 永靖  | 红土   | 75.83  | 1.58 | 12.33 | 8.32 | 彭阳  | 黄绵土  | 74.45 | 0.51 | 10.67 | 8.18 |
| 固原  | 黑垆土  | 65.78  | 1.22 | 8.31  | 7.74 | 长武  | 黑垆土  | 86.60 | 1.39 | 13.58 | 7.95 |
| 固原  | 黄绵土  | 85.55  | 1.34 | 11.36 | 8.31 |     |      |       |      |       |      |

注:全锌、有效锌的单位为 mg·kg<sup>-1</sup>;有机质单位为 g·kg<sup>-1</sup>。

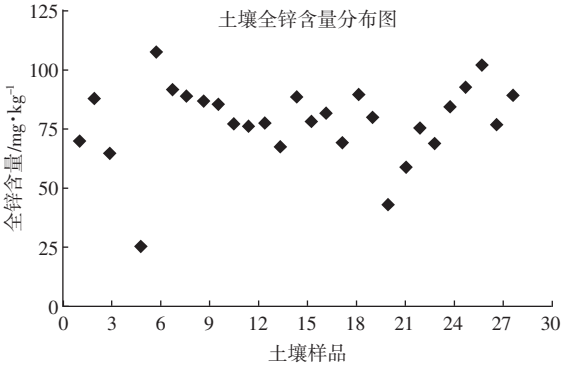


图1 土壤全锌和有效锌含量分布

Figure 1 Content and distribution of total and available zinc throughout the Loess plateau

土壤全锌是土壤供应锌的基础,其含量受到成土母质和成土过程等因素的影响。由图 2 可以看出土壤有效锌含量随着全锌含量的变化而变化,且呈现正态相关性。由表 2 土壤性质与有效锌相关性方程可以看出,土壤全锌与有效锌之间存在着极显著( $P<0.01$ )正相关关系,即对于供试黄土高原土壤,全锌含量高,有效锌也相对较高。由幂函数、指数函数和直线回归方程的回归系数可以看出,指数函数回归方程的相关系数  $r$  值最大,其相关系数达到 0.662 9,可以较好地表达

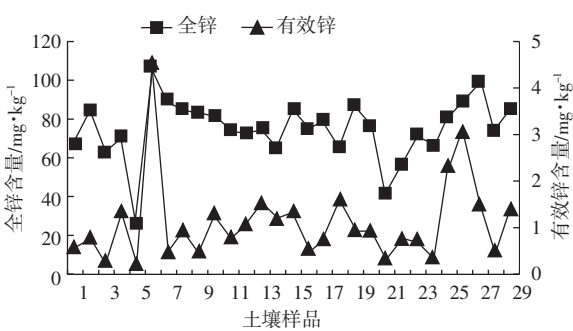


图2 土壤全锌与有效锌

Figure 2 Total soil zinc and available zinc

达供试土壤全锌与有效锌之间的相关关系。

2.2.2 土壤 pH 值与有效锌之间的关系

一般情况下,酸性土壤上锌有效性高,在中性和碱性土壤,锌可呈含锌络离子,也可沉淀为氢氧化物等,溶解度降低,有效性差<sup>[1]</sup>,也可能随着土壤 pH 值升高, 锌在土壤固相上的吸附量和吸收能力增强,从而降低锌的活性<sup>[12]</sup>。供试土壤 pH 值在 7.74~8.90 之间,土壤为石灰性和碱性土壤,回归分析结果表明在供试土壤有效锌与土壤 pH 值呈极显著的负相关关系。即土壤 pH 值降低,锌有效性增强,反之有效性差。直线、幂函数和指数函数回归方程,相关系数分别为:−0.449 7、−0.581、−0.583 4(表 2),相关性均达到极显著水平。其中指数函数的相关系数最大( $r=−0.583 4$ ),说明指数函数可以较好地表达二者的相关性。土壤 pH 值和有效锌之间的指数函数回归曲线如图 3a 所示,二者呈现良好的相关性,但对应的点比较分散,说明二者负相关关系的变异较大。

2.2.3 土壤全磷与有效锌的关系

由表 2 可以看出,土壤全磷与有效锌含量之间呈正相关关系,即在供试土壤(全磷<100 mg·kg<sup>−1</sup>),磷含量越高,土壤有效锌含量越高。由 3 种回归方程的相关系数分析,直线方程和幂函数的方程相关系数达到

表 2 土壤性质与有效锌含量回归方程

Table 2 Regression equations for soil properties and available zinc contents

| 土壤性质 | 回归方程                                    |                                                  |                                              |
|------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|      | 直线方程                                    | 幂函数                                              | 指数函数                                         |
| 全锌   | $Y=0.031\ 8X-1.276\ 7(r=0.559\ 6^{**})$ | $\lg Y=-3.096\ 9+1.640\ 3\lg X(r=0.631\ 5^{**})$ | $\lg Y=-1.006\ 1+0.0126X(r=0.654\ 9^{**})$   |
| 有机质  | $Y=5.740\ 5X+4.006\ 4(r=0.673\ 3^{**})$ | $\lg Y=0.965\ 6+0.795\ 9\lg X(r=0.774\ 5^{**})$  | $\lg Y=0.652\ 9+0.245\ 8X(r=0.635\ 5^{**})$  |
| 全磷   | $Y=0.019\ 3X+0.009\ 2(r=0.409\ 4^{*})$  | $\lg Y=-1.287\ 4+0.714\ 5\lg X(r=0.388\ 5^{*})$  | $\lg Y=-0.534\ 8+0.086X(r=0.480\ 7^{**})$    |
| 全氮   | $Y=1.207\ 9X+0.338\ 3(r=0.619\ 9^{**})$ | $\lg Y=0.143\ 3+0.677\ 9\lg X(r=0.694\ 8^{**})$  | $\lg Y=0.351+0.472\ 7X(r=0.644\ 5^{**})$     |
| pH 值 | $Y=-1.243\ 5X+11.489(r=-0.449\ 7^{**})$ | $\lg Y=10.699-11.638\lg X(r=-0.581\ 0^{**})$     | $\lg Y=5.021\ 4-0.607\ 3X(r=-0.583\ 4^{**})$ |

注:()内为各回归方程的相关系数,\*表示  $\alpha=0.05$  显著水平,\*\*表示  $\alpha=0.01$  显著水平, $n=29$ ,Y 为有效锌含量,X 为土壤性质指标值。  
Values in brackets are correlation coefficients of the equations,\* and \*\* indicate 0.05 and 0.01 significant level respectively, $n=29$ ,Y :available Zn,X :soil property.

显著水平,而指数函数的相关系数为 0.480 7,达到极显著水平。故指数函数可以较好地表达供试黄土高原土壤样品有效锌与磷之间的相关性(如图 3b)。说明在供试石灰性和碱性土壤中施磷可以增加锌的有效性,这可能是由于磷酸根与  $Zn^{2+}$  在土壤中可变电荷的表面上发生竞争性专性吸附,使  $Zn^{2+}$  进入土壤溶液,提高锌的有效性<sup>[13]</sup>。

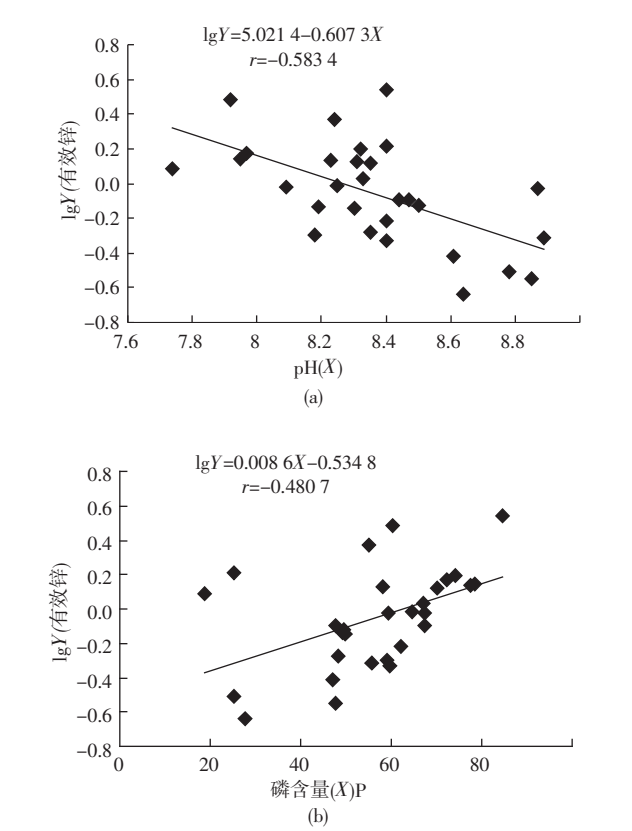


图 3 土壤磷和 pH 值与有效锌的指数函数回归曲线

Figure 3 Regression of exponential functions between total P, pH and available zinc

2.2.4 土壤有机质与有效锌的关系

由表 2 有机质与土壤有效锌之间的相关性方程可以看出,土壤有效锌与有机质含量呈显著正相关关系 ( $P<0.01$ ),3 种拟合方程的相关系数分别达到 0.673 3、0.774 5 和 0.635 5,其中幂函数回归方程(图 4a)的相关系数最大,说明其可以更好地表示土壤有机质与有效锌之间的相关性。说明土壤有机质可以活化锌元素,提高其有效性。这主要是由于土壤有机质的酸性基团可以活化土壤锌,从而形成可溶性锌的络合物,增加有效性。

2.2.5 土壤全氮与有效锌之间的关系

由土壤全氮与有效锌的回归方程(表 2)可以看出

土壤氮与有效锌之间呈极显著的正相关关系。3 个回归方程的相关系数分别为:0.619 9、0.694 8 和 0.644 5,从而可知土壤氮素与有效锌之间的正相关关系密切且稳定。其中幂函数(图 4b)回归方程相关系数最大,可以更好地表示土壤有效锌与全氮之间的关系。说明土壤施用氮肥可以提高锌的有效性,这可能是由于氮增加了土壤的酸性,从而促进锌的溶解。

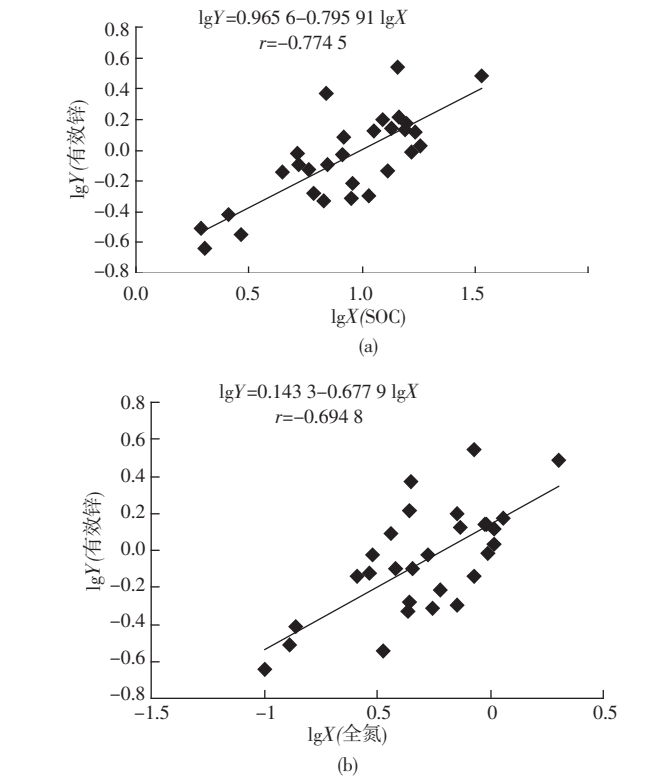


图 4 土壤有机质、全氮与有效锌的幂函数回归曲线

Figure 4 Regression of power functions between soil organic matter, total N and available zinc

2.3 影响土壤锌有效性因素的通径分析

通径分析(Path analysis)是通过自变量和因变量之间的相关分解来研究因变量的相对重要性。将试验中测定的影响土壤锌有效性的各效应因子与有效锌进行回归分析可得线性回归方程: $Y=3.136\ 9+0.016\ 4\ X_1-0.003\ 48X_2+0.756\ 3X_3-0.425\ 7X_4$ , 其中  $Y$  为有效锌, $X_1,X_2,X_3,X_4$  分别为土壤全锌、全磷、全氮和 pH 值。模型检验达到显著水平 ( $F=5.219\ 5$ , Significance  $F=0.003\ 6$ ),说明进行通径分析具有意义。通径分析结果显示,有效锌的影响因子  $X_1,X_2,X_3,X_4$  与有效锌  $Y$  的直接通径系数分别为:0.331 6、-0.073 7、0.388 1 和 -0.153 9。从各影响因子对有效锌影响的通径系数可知对有效锌的影响程度大小顺序依次为:全氮>全



锌>pH>全磷。即从供试黄土高原土壤的测定指标综合因素来看,土壤氮对锌有效性影响较大,可以促进锌的有效化,其次是全锌含量。

3 结论

(1) 供试黄土高原土壤锌含量主要分布在 50~100 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,平均值为 75.65 mg·kg<sup>-1</sup>,有效锌在 0.5~2.0 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,平均值为 1.096 mg·kg<sup>-1</sup>,含量相对较低。

(2)黄土高原土壤锌有效性与土壤全氮、全磷、有机质、全锌含量呈显著正相关关系,而与土壤 pH 值呈显著性负相关。

(3)土壤有效锌与土壤全锌、全磷、pH 值的相关性用指数函数回归方程可以较好地拟合,幂函数回归方程可以较好地表示有效锌与土壤有机质、全氮的相关关系。

(4)通径分析表明,有效锌影响因子中全氮对锌有效性的直接作用最明显,即施用氮肥可以直接增加锌的有效性。

参考文献:

[1] Curtin D, Smillie G W. Soil solution composition as affected by liming and incubation[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1983, 47(4):701-707.

[2] Meers E, Unamuno V R, Du Laing G, et al. Zn in the soil solution of unpolluted and polluted soils as affected by soil characteristics[J]. *Geoderma*, 2006, 136: 107-119.

[3] 杨丽娟, 李天来, 刘  好, 等. 长期施用有机肥和化肥对菜田土壤锌有效性的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 395-397.

  YANG L J, LI T L, LIU Y, et al. Effect of long-term fertilization on the availability of Zn in vegetable soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3):395-397.

[4] 张淑香, 王小彬, 金  柯, 等. 干旱条件下氮、磷水平对土壤锌、铜、锰、铁有效性的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2001, 7(4): 391-396.

  ZHANG S X, WANG X B, JIN K, et al. Effect of different N and P levels on availability of zinc, copper, manganese and iron under arid conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(4):391-396.

[5] Atanu Basak, Mandal L N, Halder M. Interaction of phosphorus and molybdenum and the availability of zinc, copper, manganese, molybde-

num and phosphorus in waterlogged rice soil [J]. *Plant and Soil*, 1982, 68:271-278.

[6] 曾昭华. 农业生态与土壤环境中锌元素的关系 [J]. 吉林地质, 2001, 20(3):58-63.

  ZENG Z H. The relationship between agricultural ecology environment and the zinc element in soil environment[J]. *Jilin Geology*, 2001, 20(3): 58-63.

[7] 何忠俊, 华  路, 洪常青. 氮锌交互作用对黄棕壤锌形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2):209-212.

  HE Z J, HUA L, HONG C Q. Effects of interaction between nitrogen and zinc on forms of zinc in Yellow-Brown soil[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2004, 23(2):209-212.

[8] 刘  铮, 朱其清. 微量元素的农业化学[M]. 北京: 农业出版社, 1991.

  LIU Z, ZHU Q Q. Agrochemistry of microelements [M]. Beijing: Agriculture Press, 1991.

[9] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京: 农业出版社, 1985.

  ZHU X M. Soil and agriculture in Loess Plateau [M]. Beijing: Agriculture Press, 1985.

[10] 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, et al. Content and distribution of trace elements and fertilizer efficiency in soils of loessal region [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1991, 28(3):317-326.

[11] 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 elements of groundwater in the area of the middle and lower beaches of the Yangtze river[M]. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, 1996, 70(3):262-269.

[12] 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 H M, LV J L, XU M G, et al. Advances in soil properties' effect on zinc adsorption[J]. *Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For(Nat. Sci. Ed.)*, 2006, 34(5):114-118.

[13] 刘忠珍, 刘世亮, 刘  芳, 等. 不同磷含量对石灰性潮土吸附、解吸有效性锌的影响[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(4):472-476.

  LIU Z Z, LIU S L, LIU F, et al. The effects of phosphate on adsorption and desorption of available zinc in calcareous soil [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(4):472-476.