

# 子午岭植被对土壤团聚体及磷素分布的驱动作用

韩 馥<sup>1</sup>, 王百群<sup>1,2,3</sup>, 张尚鹏<sup>4</sup>, 喻佳洛<sup>4</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100;

2.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**对子午岭林区农业及林草植被下土壤磷素的分布与变化进行了研究,结果表明:林草植被有利于促进土壤大的水稳性团聚体的形成,大团聚体的含量随土层深度增加而下降。在草地中,植物根系推动了下层土壤中的磷素向上迁移,使上层土壤全磷含量显著高于下层土壤中的含量。在林地土壤中,处于腐解过程中的凋落林冠叶片和表层土壤中的可溶性磷,在水分入渗的作用下,向亚表层土壤中迁移,使亚表层土壤全磷含量提高。这说明草本植物和乔木林驱动土壤全磷垂直分布的机理不同。林草植被土壤中,分布在 $>0.25$  mm 的各粒级团聚体中全磷量随着土层深度的增加而下降,而分布在 $<0.25$  mm 的团聚体中全磷量随土层深度的增加而提高,生长林草植被有益于促进上层土壤中磷素分布在大的团聚体中,同时磷素也促进了大团聚体的形成和保持。

**关键词:**土壤团聚体; 土壤磷素; 植被; 子午岭

**中图分类号:**S152.4<sup>+</sup>9; S153.6<sup>+</sup>1; S158.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)05-0118-05

## Driving Effects of Vegetation on the Distributions of Soil Aggregates and Phosphorus in Ziwuling Mountain

HAN Fu<sup>1</sup>, WANG Baiqun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shangpeng<sup>4</sup>, YU Jialuo<sup>4</sup>

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shanxi 712100, China; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The study on the change and distribution of phosphorus (P) in soils grown crops, grass or forest was conducted in Ziwuling Mountain. The contents of different sizes of macroaggregates declined with the increase in soil depth in grassland or forestland. In the grassland, the roots of grass caused the P in deep soil layers to move to the topsoil, which resulted in the level of P in topsoil was greater than that in the subsoil. And in the forestland, the dissolved P derived from decaying leaves or topsoil moved to subsoil due to water movement, which caused that the contents of P in subsoil was greater than that in topsoil. It could be seen that the mechanisms driving P distribution in soil profile were different between grass and forest. It was understood that grass and forest could promote the formation of soil macroaggregate. P distributed in the aggregate sizes of  $>0.25$  mm decreased with the increase in soil depth, and P distributed in the aggregate sizes of  $<0.25$  mm, in turn, rose with the increase in soil depth in grassland or forestland. These results suggested that growth of grass or forest could make P distribute in the macroaggregates and P could lead the formation of macroaggregates and the stability of aggregates in the grassland or forestland.

**Keywords:** soil aggregate; soil phosphorus; vegetation; Ziwuling Mountain

收稿日期:2019-04-21

修回日期:2019-05-28

**资助项目:**国家自然科学基金(40301024);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41561144011);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费(A314021403-C6);中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW029~05);科技基础性工作专项;农田生态系统资源分布与生源要素现状调查(2014FY210112)

**第一作者:**韩馥(1994—),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事土壤重金属修复。E-mail:hanfu11@tom.com

**通信作者:**王百群(1968—),男,陕西渭南人,博士,副研究员,主要从事土壤养分循环研究。E-mail:bqwang@ms.iswc.ac.cn

磷素是植物生长所需的重要营养元素之一,土壤磷素的供给能力与植物生长状况有着密切的关系,同时植物也会对土壤磷素的变化产生明显的影响作用。土壤磷素一直是土壤—植物系统中养分循环与平衡研究的重要领域之一<sup>[1-3]</sup>。在自然林草生态系统中,未施肥磷素化肥条件下,长期生长的植被对土壤磷素的生物地球化学循环过程起着积极的推动作用<sup>[4]</sup>,因此,有必要对自然植被条件下土壤磷素的变化进行研究。有些研究者对不同区域农田土壤肥力的基础及磷素的变化及其有效性进行了系统的研究<sup>[5-10]</sup>。为了揭示土壤养分在土壤中的贮存形式,一些研究对土壤养分在不同土壤颗粒中的分布特点进行了研究<sup>[11-17]</sup>。一些学者对不同植被生态系统中土壤—植被生态系统中磷素循环进行了研究,这些研究为认识和调控区域农田及林草地土壤中磷素的循环过程具有重要的意义<sup>[18-19]</sup>。在黄土高原丘陵区的一些地区,分布有不同的植被类型,为研究植被与土壤磷素的关系提供了研究条件,因此,有必要对该区不同类型植被条件下土壤磷素的变化与分布进行研究。

本项研究以黄土丘陵区子午岭林区坡耕地、草地及林地3种不同类型植被生态系统为对象,研究不同植被下土壤全磷的剖面分布、土壤团聚体的构成特点及磷素在不同粒级团聚体中的分布,以此来阐明植被对土壤团聚体和磷素变化的驱动作用,揭示植被对土壤地球化学的影响,明确土壤—植被系统中磷素行为。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区基本概况

本文所选的研究区位于甘肃省陇东子午岭林区的庆阳市合水县连家砭生态林场。研究区海拔高度为1 100~1 500 m,黄土覆盖深厚,其厚度为50~100 m,地貌类型属于典型的黄土丘陵。该区年平均降水量为587.6 mm,其中7月和8月的降雨量约占全年总降水量的40%,干燥度约为0.97,年均温为7.40℃,属于典型的暖温带半干旱冷凉气候<sup>[20]</sup>。土壤类型主要以石灰性褐土为主,其次为粗骨褐色土,再次为潜育化草甸土,主要分布于沟底两侧低位阶地及沟道。本区的地带性植被类型属于森林草原<sup>[20]</sup>。

### 1.2 研究样地概况

(1) 坡耕地。坡耕地种植的主要作物为谷子(*Setaria italica*)、土豆(*Solanum tuberosum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)或黄豆(*Glycine max* (L.) Merr.)轮作。坡耕地的坡度为10°~15°。

(2) 白羊草地。白羊草地的坡度为8°~12°。白羊草草地植物以白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)

为主,占到植物总量的85%,草地中还分布有其他植物种类,包括短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii* Pamp.)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、白头翁(*Pulsatilla chinensis* (Bunge) Regel)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum* Hand. —Mazz)、糙叶黄耆(*Astragalus scaberrimus*)、香青(*Anaphalis sinica* Hance)、菊叶委陵(*Potentilla tanacetifolia*)菜等植物<sup>[20]</sup>。白羊草地的地上生物量总计为750 g/m<sup>2</sup>。

(3) 辽东栎林地。辽东栎林地坡度为6°~10°。在辽东栎林地中,乔木层主要是辽东栎(*Quercus wutaishansea* Mary),林下的主要植物包括茜草(*Rubia cordifolia* L.)、异穗苔草(*Carex heterostachya* Bge.)、红瑞木(*Swida alba* Opiz)、糙叶五加(*Acanthopanax henryi* (Oliv.) Harms)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii* Hance)、金银忍冬(*Lonicera maackii* (Rupr.) Maxim.)、葱皮忍冬(*Lonicera ferdinandii* Franch.)、鞘柄菝葜(*Smilax stans* Maxim.)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus* Bge.)等<sup>[20]</sup>。地表枯枝落叶层厚度为3~5 cm,主要由处于腐解及半腐解状态的植物叶片和枯枝残体构成。

### 1.3 土壤样品采集与测定方法

1.3.1 土壤样品采集方法 分别选择白羊草草地、辽东栎林地和坡耕地为研究样地,在每块研究样地中,随机选择9个土壤样品采样点,在每个采样点,除去地表植物枯落物,挖掘一个土壤剖面,采集剖面不同深度土层原状土壤样品,采样土层深度分别为0—5 cm、5—15 cm、15—25 cm、25—35 cm和35—50 cm,在这9个样点中,随机选择3个采样点作为一组,将相同深度土层的原状土壤样品放在一起,形成一个混合原状土壤样品,构成每块样地中各个取样土层的3个重复原状土壤样品。将土样自然风干,用于测定土壤水稳性团聚体组成和土壤磷素。

#### 1.3.2 土壤样品分析方法

(1) 土壤水稳性团聚体组成的测定:采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体构成<sup>[21]</sup>。准确称取20.00 g的风干原状土样,置于2 mm土壤筛中,将土壤平铺于整个筛面,向土壤中喷去离子水,使土壤达到湿润状态。在2 mm土壤筛的下面套接1 mm、0.5 mm和0.25 mm的筛,放入土壤套筛固定架中,将套筛放入装有去离子水的铁皮桶中,使水面淹没最上面的土壤套筛,在3 cm距离的称动范围内,上下移动套筛,移动频率为每分钟移动30次,共持续移动10 min。将残留在筛内的土壤团聚体全部转入铝盒中,在60℃

的烘箱中,烘干 10 h,烘干后,立即称重。根据测定时所取的原装土质量和各粒级团聚体的质量,计算相应粒级团聚体的含量。将烘干后的团聚体样品进行研磨,使其全部通过 0.25 mm 筛子。

(2) 土壤及团聚体中全磷的测定:酸溶钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>。称取 0.2500 g 过 0.25 mm 筛的土样或水稳性团聚体样品,采用硫酸—高氯酸消煮样品,钼锑抗比色法测定。采用两种方式表示各粒级中团聚体磷的含量,一是以团聚体质量为基础,表示团聚体中全磷的含量;二是以原土整体质量为基础,表示团聚体中全磷的含量。

1.3.2 数据处理 采用 Excel 2003 对数据进行整理和统计分析并绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水稳性团聚体分布

不同植被条件下土壤水稳性团聚体分布见图 1。在坡耕地、白羊草地及辽东栎林地土壤中, $>2$  mm、 $1\sim 2$  mm、 $0.5\sim 1$  mm 和  $0.25\sim 0.5$  mm 的水稳性团聚体含量随着土层深度的增加,表现出下降的趋势,然而,在这 3 类植被下,随着土层深度的增加,土壤中  $<0.25$  mm 的微团聚体含量却表现为增加的趋势,表明在这 3 类植被条件下,随土层深度增加,水稳性团聚体的稳定性下降。比较这 3 种植被类型下相同土层土壤水稳性团聚体的构成,可以看出,在各土层中, $>0.25$  mm 各粒级水稳性团聚体的含量为白羊草地 $>$ 辽东栎林地 $>$ 坡耕地,而 $<0.25$  mm 水性含量为白羊草地 $<$ 辽东栎林地 $<$ 坡耕地,由此表明,长期生长白羊草最有利于大的土壤团聚体的形成,辽东栎林地次之,而长期耕种的耕地土壤中,大的团聚体较难形成,大团聚体的数量少,而以微团聚体( $<0.25$  mm)为主。土壤中团聚体的形成及其稳定性取决于多种因素,其中土壤中有机的积累状况及土壤的扰动程度对不同粒级团聚体的形成有着密切的关系。在白羊草地中,由于植物根系及地上植物残体向土壤输入了有机物,促进了土壤有机质的累积;在辽东栎林地,由于林冠向土壤归还了大量的凋落物,从而促使土壤有机质的累积。在这两类植被条件下,有机质的累积,而且土壤不受扰动,是有益于形成大团聚体和团聚体稳定性高的主要原因。在坡耕地中,由于耕作作用,易于引起土壤有机质分解,而且农作物收获,向土壤中输入有机物数量有限,土壤受人类耕作活动扰动,这些因素导致了坡耕地土壤有机质不易累积,从而引起土壤大的团聚体难以形成和保持,土壤团聚体的稳定性较弱。

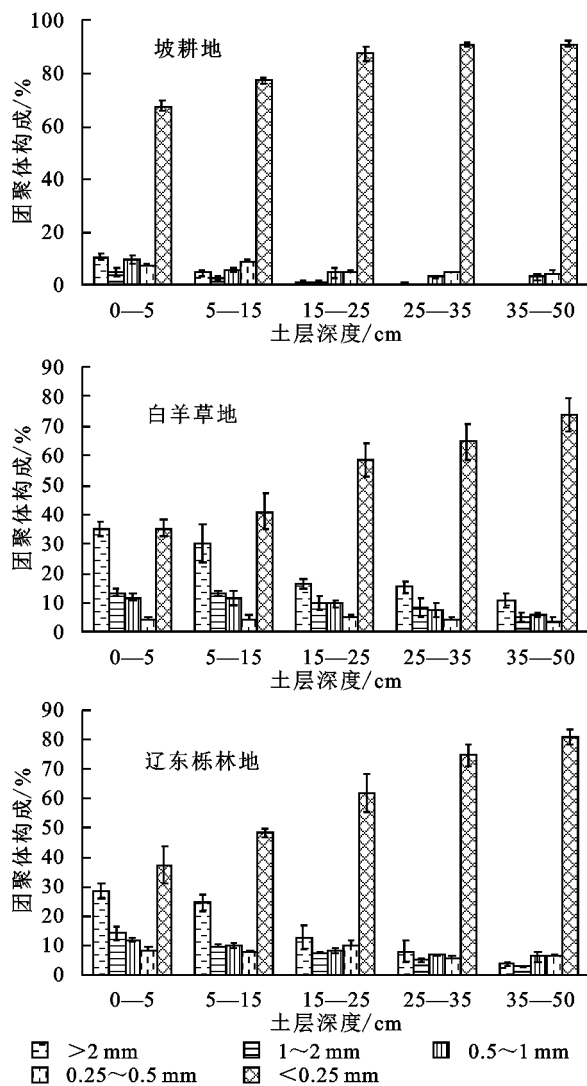


图 1 子午岭不同土地利用类型土壤团聚体构成

### 2.2 土壤全磷的剖面分布

不同植被条件下土壤全磷的分布见图 2。在这 3 类植被条件下,表层土壤(0—5 cm)全磷含量的顺序为坡耕地 $>$ 白羊草地 $>$ 辽东栎林地。坡耕地和白羊草地土壤全磷均随剖面深度增加而下降,白羊草地中土壤全磷随土层深度增加而下降的幅度最大。在辽东栎林地土壤剖面中,5—25 cm 土层中土壤全磷的含量高于其他土层中全磷的含量。由此可见,这 3 类植被下,土壤剖面中全磷的分布模式不同。在坡耕地中,土壤全磷较高主要是由于施用磷肥,磷肥累积在土壤中。白羊草地中,由于植根系吸收下层土壤中的磷素,通过根系使下层土壤中磷素向上层土壤中迁移,上层土壤中植物根系分布较多,而且地上部植物残体中的磷归还到上层土壤中,这样就由于植物的驱动作用,导致了上层土壤中全磷含量明显高于下层土壤中的含量。在辽东栎林地中,地表堆积有大量的半腐解状态叶片,表层土壤水分条件好,土壤孔隙较多,有利于水分传输,在降水条件下,地表半腐解状态叶片中的可溶性磷及表层

土壤中的可溶性磷随水分入渗而向下层迁移,但是由于一方面土壤对磷有一定的吸持作用,另外土壤孔隙相对较小,这样就使磷的迁移距离相对较短,所以导致 5—25 cm 土层中全磷的含量较高,这就是在林地中,通过凋落的植物叶片及其腐解过程来驱动林地土壤全磷在一定深度土层范围内分布。

2.3 土壤水稳性团聚体中全磷的分布

为了比较分析不同粒级水稳性团聚体中磷的分布及其在土壤全磷库中的份额,分别以团聚体质量和原土质量为基础来计算团聚体中全磷的含量,由此来考察磷素分布特点。首先分析各粒级团聚体中全磷的含量。3 类植被下土壤水稳性团聚体中全磷的分布见表 1。在这 3 类植被下的土壤剖面中,>0.25 mm 各粒级水稳性团聚体中全磷的含量高于<0.25 mm 的微团聚体中全磷的含量。在坡耕地中,各粒级团聚体中全磷的含量随土层深度增加而降低。在白羊草地中,表层土壤(0—5 cm)中>0.25 mm 的各粒级团聚体中全磷的含量高于下层土壤的含量,而<0.25 mm 的团聚体中全磷含量随土层深度增加而下降。在辽东栎林地土壤中,各土层中>0.25 mm 的各粒级团聚体中全磷的含量相近,但是<0.25 mm 的团聚体中全磷含量随土层深度增加而增加。由此可见,在这 3 类植被下,土壤剖面中各粒级团聚体中全磷含量随土层深度的变化不尽相同。

以原土质量为基础计算的各粒级团聚体全磷含量取决于各粒级团聚体在土壤中所占的比例及团聚体中全磷的含量水平。由表 1 中可以看出,在 3 类植被下的土壤中,分布在>0.25 mm 的各粒级团聚体中全磷量随着土层深度的增加而下降,而分布在<0.25 mm 的团聚体中的全磷量随土层深度的增加而提高。在各个土层中,白羊草地和辽东栎林地土壤中分布在>0.25 mm 的各粒级团聚体中全磷量高于坡耕地土壤分布在相应粒级团聚体中的磷量,但是,白羊草地和辽东栎林地土壤中分布在<0.25 mm 的团聚体中全磷量低于坡耕地中分布在<0.25 mm 的团聚体中的量。这就表明,生长自然林草植被有利于促进土壤磷素分布在大的团聚体中,同时磷素也促进了大团聚体的形成和保持。

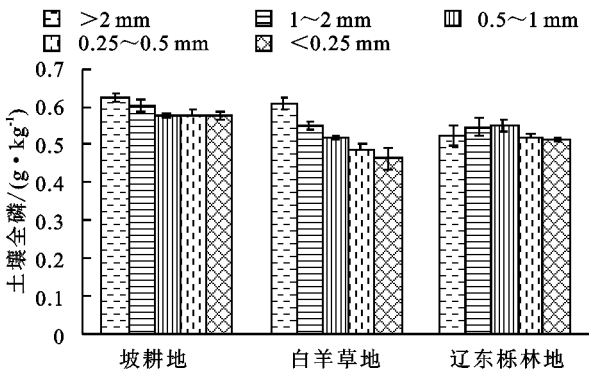


图 2 子午岭不同植被下土壤全磷的剖面分布

表 1 子午岭不同植被下土壤水稳性团聚体中的全磷分布 g/kg

土层/cm	粒径/mm	坡耕地		白羊草草地		辽东栎林地	
		团聚体基	原土基	团聚体基	原土基	团聚体基	原土基
0—5	>2	0.620 (0.006)	0.066 (0.006)	0.676 (0.015)	0.239 (0.021)	0.586 (0.007)	0.166 (0.017)
	1~2	0.656 (0.014)	0.031 (0.011)	0.654 (0.023)	0.088 (0.004)	0.594 (0.012)	0.084 (0.015)
	0.5~1.0	0.632 (0.019)	0.062 (0.008)	0.680 (0.014)	0.079 (0.008)	0.598 (0.008)	0.071 (0.003)
	0.25~0.5	0.633 (0.015)	0.045 (0.009)	0.673 (0.014)	0.029 (0.006)	0.568 (0.014)	0.048 (0.006)
	<0.25	0.619 (0.011)	0.418 (0.007)	0.482 (0.078)	0.174 (0.042)	0.389 (0.097)	0.155 (0.058)
5—15	>2	0.624 (0.034)	0.029 (0.007)	0.564 (0.048)	0.175 (0.053)	0.599 (0.016)	0.146 (0.018)
	1~2	0.618 (0.031)	0.016 (0.005)	0.582 (0.021)	0.076 (0.007)	0.601 (0.011)	0.059 (0.003)
	0.5~1.0	0.631 (0.034)	0.037 (0.009)	0.581 (0.025)	0.066 (0.014)	0.612 (0.005)	0.061 (0.005)
	0.25~0.5	0.630 (0.033)	0.058 (0.002)	0.617 (0.019)	0.029 (0.008)	0.605 (0.006)	0.046 (0.003)
	<0.25	0.596 (0.025)	0.462 (0.024)	0.472 (0.084)	0.204 (0.065)	0.488 (0.049)	0.234 (0.018)
15—25	>2	0.550 (0.012)	0.007 (0.001)	0.604 (0.016)	0.101 (0.009)	0.605 (0.007)	0.076 (0.024)
	1~2	0.540 (0.012)	0.007 (0.002)	0.605 (0.011)	0.061 (0.014)	0.598 (0.013)	0.044 (0.000)
	0.5~1.0	0.629 (0.013)	0.031 (0.014)	0.587 (0.009)	0.056 (0.006)	0.585 (0.030)	0.048 (0.007)
	0.25~0.5	0.603 (0.036)	0.030 (0.005)	0.600 (0.008)	0.031 (0.006)	0.579 (0.032)	0.059 (0.014)
	<0.25	0.571 (0.008)	0.500 (0.020)	0.456 (0.029)	0.270 (0.041)	0.524 (0.024)	0.322 (0.028)

注:表中括号内数据为标准误差。

3 结论

林草植被有利于促进土壤大的水稳性团聚体的形成,大团聚体的含量随土层深度增加而下降。林草植被土壤中,分布在>0.25 mm 的各粒级团聚体中全磷量随着土层深度的增加而下降,而分布在<0.25

mm 的团聚体中全磷量随土层深度的增加而提高。表明了生长林草植被有益于促进上层土壤中磷素分布在大的团聚体中,同时磷素也促进了大团聚体的形成和保持。

草本植物和乔木林驱动土壤全磷垂直分布的机理不同。在草地中,植物根系推动了下层土壤中的磷素向

上迁移,使上层土壤全磷含量显著高于下层土壤中的含量。在林地土壤中,处于腐解过程中的凋落林冠叶片和表层土壤中的可溶性磷,水分入渗的作用下,向亚表层土壤中迁移,使亚表层土壤全磷含量提高。

# 参考文献:

- [1] Weihrauch C, Opp C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far[J]. *Geoderma*, 2018,325:183-194.
- [2] Zhou Q, Daryanto S, Xin Z, et al. Soil phosphorus budget in global grasslands and implications for management[J]. *Journal of Arid Environments*, 2017,144:224-235.
- [3] Dodd R J, Sharpley A N. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015,105:282-293.
- [4] Childers D L, Doren R F, Jones R, et al. Decadal Change in Vegetation and Soil Phosphorus Pattern across the Everglades Landscape[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003,32(1):344-362.
- [5] 杨文治,余存祖.黄土高原区域治理与评价[M].北京:科学出版社,1992.
- [6] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.土壤肥实质的研究.Ⅰ黑土[J]. *土壤学报*,1984,21(3):229-237.
- [7] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.土壤肥实质的研究.Ⅱ棕壤[J]. *土壤学报*,1985,22(2):113-119.
- [8] 周礼恺,严昶升,武冠云.土壤肥实质的研究.Ⅲ红壤[J]. *土壤学报*,1986,23(3):193-203.
- [9] 邱凤琼,严昶升,陈恩凤.土壤肥实质的研究.Ⅳ水稻土[J]. *土壤学报*,1986,23(3):193-203.
- [10] Milic, S, Ninkov J, Zeremski, T, et al. Soil fertility and

phosphorus fractions in a calcareous chernozem after a long-term field experiment[J]. *Geoderma*, 2019,339:9-19.

- [11] Garland G, Bünemann E. K, Oberson A, et al. Phosphorus cycling within soil aggregate fractions of a highly weathered tropical soil: A conceptual model[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,116:91-98.
- [12] Turron M B, Teresa B, Francisco L, et al. Effects on soil phosphorus dynamics of municipal solid waste compost addition to a burnt and unburnt forest soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642:374-382.
- [13] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥性能及其组成比例在平均土壤肥力中的作用[J]. *土壤学报*,1994,31(1):18-28.
- [14] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.土壤的自动调节性能与抗逆性能[J]. *土壤学报*,1991,28(2):168-176.
- [15] 陈恩凤.土壤肥力物质基础及其调控[M].北京:科学出版社,1990.
- [16] 汪景宽,张继宏,张旭东,等.不同肥力棕壤各粒级团聚体中氮素状况的研究[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1999.
- [17] 汪景宽,张继宏,王雷,等.棕壤不同粒级微团聚体中磷素的保持与供应[J]. *土壤通报*,2001,32(3):113-115.
- [18] 王佑民,刘秉正著.黄土高原防护林生态特征[M].北京:中国林业出版社,1994.
- [19] 裴海昆,朱志红,乔有明.不同草甸植被类型下土壤腐殖质及有机磷类型探讨[J]. *草业学报*,2001,10(4):18-23.
- [20] 王百群,吴金水,赵世伟.子午岭林区植被类型对土壤氮素的效应[J]. *水土保持通报*,2002,22(6):23-25.
- [21] 严昶升.土壤肥力研究法[M].北京:中国农业出版社,1988.
- [22] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.

(上接第 117 页)

- [22] Li Z, Liu X, Zhang X, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content[J]. *Agricultural Water Management*, 2008,95(4):498-502.
- [23] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. *农业机械学报*,2015,46(12):117-126.
- [24] 苏莹,王全九,叶海燕,等.咸淡轮灌土壤水盐运移特征研究[J]. *灌溉排水学报*,2005,24(1):50-53.
- [25] Beesley L, Eduardo Moreno-Jiménez, Clemente R, et al. Mobility of arsenic, cadmium and zinc in a multi-element contaminated soil profile assessed by in-situ soil pore water sampling, column leaching and sequential extraction[J]. *Environmental Pollution*, 2010,158(1):

155-160.

- [26] 杨艳,王全九.微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析[J]. *水土保持学报*,2008,22(1):13-19.
- [27] 陈丽娟,冯起,王昱,等.微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. *农业工程学报*,2012,28(8):44-51.
- [28] 吴忠东,王全九.入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. *农业机械学报*,2010,41(7):64-69,75.
- [29] Gawad G A, Arslan A, Gaihbe A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999—2002) [J]. *Agricultural Water Management*, 2005,78(1/2):39-53.