

# 黄土高原沟壑区不同施肥条件下土壤速效钾含量研究

从怀军<sup>1</sup>, 张展<sup>2</sup>, 徐斌<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 黄河水文水资源科学研究院, 郑州 450004)

**摘要:**在可利用耕地资源很少的黄土高原地区,查清耕地土壤肥力,指定适合的肥料,增加土地的活力和动力,显得尤为重要。速效钾是植物需要的重要元素,更是一个衡量土壤肥力的重要指标。试验在黄土高原陕西省长武农业生态试验站模拟弃土场,设3种施肥处理:A施有机肥(羊粪),施肥量为30 000 kg/hm<sup>2</sup>;B施秸秆,施肥量为9 000 kg/hm<sup>2</sup>;C不施肥,AO(施有机肥,不种植物)、BO(施秸秆,不种植物)、CK(不施肥,不种植物)作为对照,选取了白三叶、草木樨、紫穗槐、柠条、黑麦草5种植物为试材,探究了在不同土壤速效钾处理下各植物小区0—10、10—20 cm土层的养分含量。结果表明:0—10 cm,在施肥条件下,(有机肥、秸秆)土壤速效钾含量要高于不施肥土壤含量。在不施肥条件下,所有小区土壤速效钾含量均低于空地(CK)。10—20 cm层内,在3种不同施肥条件下,各小区土壤速效钾含量基本持平,变化不大,只有在黑麦草+白三叶小区内施有机肥条件下,土壤有效钾含量较高。在不同施肥条件下,草木樨小区土壤速效钾含量比空地(CK)提高了5.14 mg/kg,增幅为3.46%。土壤速效钾含量均表现为:有机肥>秸秆>不施肥。在不施肥条件下,同样出现了平均含量低于空地的情况,这也从侧面说明了初期土壤培肥时需要补充植物生长所需的养分。在长武长期连续定位试验数据基础上,采用实地种植和长期观测相结合的研究方法,定量模拟研究了不同施肥条件下土壤速效钾含量,为该地区合理利用土壤速效钾,进行生态环境建设、土壤资源的持续高效利用和农业生产提供依据。

**关键词:**水土保持;不同施肥条件;土壤速效钾;黄土高原沟壑区

**中图分类号:**S157.4<sup>+</sup>1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2018)04-0129-05

## Study on Available Potassium Contents in Soils Under Different Fertilization Conditions in Highland and Gully Region of the Loess Plateau

CONG Huaijun<sup>1</sup>, ZHANG Zhan<sup>2</sup>, XU Bin<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Yellow River Institute of Hydrology and Water Resources, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** It is very important to check the soil fertility of cultivated land and specify the appropriate fertilizer and increase the vitality and power of the land in the Loess Plateau where the cultivated land resources are insufficient. Potassium is an important element of plant requirement, but also an important indicator of soil fertility. The experiment was conducted in the simulated spoil field at Changwu Agricultural Ecology Experimental Station in Shaanxi Province on the Loess Plateau. We set three soil fertilization treatments including A: the organic fertilizer (sheep manure) was used at the rate of 30 000 kg/hm<sup>2</sup>, B: Straw use rate is 9 000 kg/hm<sup>2</sup>, C: no fertilization, AO (organic fertilizer, no plant), BO (straw, no plant), CK (no fertilizer, no plant) as a control, *Trifolium repens*, *Coronilla varia*, *Melilotus suaveolens*, *Caragana korshinskii* and *Lolium perenne* were used as test plants to study the nutrient contents of 0—10, 10—20 cm soil layers of various plant communities under different treatments. The results showed that in 0—10 cm soil available potassium (organic manure, straw) was higher than that of non-fertilized soil. Under the condition of no fertilization, the available potassium in soil in all plots was lower than CK. Under the three different fertilization conditions, the contents of available potassium in different plots were almost the same in 10—20 cm layer, and little change was found. Only in the organic fertilizer application of *Lolium perenne* + *Trifolium repens* plot, the content of soil available potassium was higher. Under the condition of no fertilizing, the soil

收稿日期:2016-11-09

修回日期:2017-06-26

资助项目:科技基础性工作专项“能源开发区生态系统与环境变化调查”(2014FY210130)

第一作者:从怀军(1965—),男,陕西杨凌人,硕士,工程师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:hjcong@ms.iswc.ac.cn

通信作者:张展(1984—),男,河南濮阳人,硕士,工程师,主要从事生产建设项目水土保持方案编制、水土保持设施竣工验收、水土保持生态工程规划与设计。E-mail:155090896@qq.com

available potassium content in *Melilotus suaveolens* plot increased by 5.14 mg/kg compared with CK, an increase rate was 3.46%. Soil available potassium contents decreased in the order: organic fertilizer> straw > no fertilizer. Under the condition of no fertilization, the average content is lower than the CK, indicating that the initial soil fertilization need to supplement the nutrients needed for plant growth. Based on the long-term continuous positioning test data of Changwu, the soil available potassium content under different fertilization conditions was studied quantitatively by combination of field test and long-term observation. The soil available potassium was investigated, which can provide the bases for rational utilization of soil in this area, the sustainable and efficient use of soil resources and agricultural production.

**Keywords:**soil and water conservation; different fertilization conditions; soil available potassium; highland and gully region of the Loess Plateau

黄土高原沟壑区地势较高,坡度较大,且水土流失严重,可利用耕地资源很少,对黄土高原沟壑区的耕地地力研究能够查清耕地土壤的地力状况、肥力水平,实现资源的优化配置,促进农业可持续发展。钾是植物生长发育必不可少的营养元素之一,它参与植物众多的生理生化过程。比如,参与植物的光合作用、能量储存、呼吸作用、细胞增大等,它是植物很多重要有机化合物的组成成分之一,钾还能促进植物早期的根系形成和生长,提高植物的适生能力。有效钾是指土壤中含有的能为作物当季吸收利用的含钾量,而作物对钾的吸收也受到土壤中钾浓度的影响,因此,有效钾是反映土壤中钾水平的一个相对指标。测定土壤中有效钾的含量,能够相对地反映土壤的供钾水平,并可借此判断土壤是否有施用钾肥的必要。施入有机肥能降低土壤对钾的吸附,把土壤中难溶钾活化为可利用钾,促进植物对钾的吸收和利用<sup>[1-2]</sup>,从而提高土壤中有效钾的含量,扩大土壤中有效钾库。张继宏等<sup>[3]</sup>研究表明,棕黄土使用有机肥后土壤中钾含量显著增加。化肥与有机肥配合使用,可使土壤中全氮和速效氮含量明显增加<sup>[4-5]</sup>。王林权等<sup>[6]</sup>研究指出,施用鸡粪可显著提高土壤中速效钾含量。施入有机肥,可以补充土壤中有效钾的含量,对土壤中钾的耗竭起到抑制的作用<sup>[7]</sup>。周晓芬等<sup>[8]</sup>研究表明,有机肥的施入能明显增加土壤中速效钾和缓效钾的含量,使得土壤供钾能力增强,并且有机肥供钾能力受到土壤类型和环境因素的影响。刘义新等<sup>[9]</sup>

研究指出,有机肥能促进土壤中储存态钾转化为有效钾,增加土壤中钾的有效性,对土壤中交换性钾也有增加的作用。

1 试验地概况

试验采用实地种植和长期观测相结合的研究方法。采取土样后带回试验测定,后期利用 Excel 软件处理数据。试验设在陕西省长武农业生态试验站模拟弃土场,长武站地理坐标为 107°41'E,35°14'N,属暖温带半湿润大陆性季风气候,降雨季节分布不均,年均降水 584 mm,地下水位 50~80 m。年均气温 9.1℃,无霜期 171 d。地带性土壤为黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,土体疏松,通透性好,具有良好的“土壤水库”效应。试验选取一片平整场地修建小区种植植物,小区用砖块砌筑,长×宽×高为 2 m×2 m×0.8 m,将附近荒地生土填在小区内模拟弃土场,填土厚度为 70 cm,同时,在每个小区内中央插有 2 m 长中子管,用中子仪测定土壤水分含量<sup>[10-12]</sup>。小区示意图见图 1。试验前土壤背景养分状况见表 1。



图 1 试验小区示意图

表 1 试验地土壤养分状况

项目	土层/ cm	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	硝态氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
背景值	0—10	4.50	4.86	2.76	2.75	121.22
	10—20	4.29	4.89	2.21	2.46	113.46
施有机肥	0—10	9.36	5.49	2.79	22.26	211.21
	10—20	8.12	5.37	2.39	21.32	190.81
施秸秆	0—10	6.92	6.95	2.38	14.64	158.59
	10—20	5.94	5.66	2.15	12.67	140.64

2 试验设计

植物主要是选择了在陕西地区广泛应用于水土保持和绿化中的常见豆科、禾本科植物。分别是:柠条、紫穗槐、白三叶、草木樨和黑麦草。各植物生长特性见表 2。

表 2 试验植物

植物	拉丁学名	特性
白三叶	<i>Trifolium repens</i> L.	多年生豆科草本植物, 高约 30~50 cm。根系较浅, 有根瘤。抗逆性强, 耐践踏、恢复快, 但不耐干旱。在水土保持方面有极其广泛的应用
草木樨	<i>Melilotus suaveolens</i> Ledeb.	二年生或一年生草本, 主根深达 2 m 以下, 高 50~120 cm, 具有很强的耐寒、耐旱、耐酸碱和耐土壤贫瘠等性能
紫穗槐	<i>Coronilla varia</i> L.	多年生豆科草本植物, 高约 30~50 cm。直根系, 有根瘤。具有抗旱抗寒、耐贫瘠、耐践踏性, 再生能力很强, 是良好的水土保持植物
柠条	<i>Caragana korshinskii</i> Kom.	豆科落叶大灌木, 根系极为发达, 主根入土深, 株高为 40~70 cm, 最高可达 2 m 左右。耐旱、耐寒、耐高温, 是水土保持和固沙造林的重要树种之一, 属于优良固沙和绿化荒山植物
黑麦草	<i>Lolium perenne</i> L.	多年生禾本科植物, 高约 50~100 cm, 须根发达, 入土浅, 耐湿、抗寒, 成坪时间短, 再生能力强

植物播种设 3 种不同施肥处理方式: A 施有机肥(羊粪), 施肥量为 30 000 kg/hm<sup>2</sup>; B 施秸秆, 施肥量为 9 000 kg/hm<sup>2</sup>; C 不施肥, 不作处理; 设 3 个空地: AO 施有机肥, 不种植物; BO 施秸秆, 不种植物; CK 不施肥, 不种植物。试验方案见表 3。

表 3 试验方案

代号	试验处理	试验水平	重复
A	施有机肥	30000 kg/hm <sup>2</sup>	1
B	施秸秆	9000 kg/hm <sup>2</sup>	1
C	不施肥		1
AO	施有机肥, 不种植物		1
BO	施秸秆, 不种植物		1
CK	不施肥, 不种植物		1

羊粪、秸秆(已粉碎)从当地农家购买。羊粪和秸秆均在种植植物前一次性施入土壤中, 肥料施入土壤 10—20 cm, 充分与土壤混合均匀, 然后将土地平整。混播植物种子按 1:1 比例播种, 采用单播和混播两种方式。单播、混播方式均为条播。植物具体种植模式如下:

(1) 将柠条、黑麦草、草木樨分别在 3 种不同施肥处理下单播, 重复 1 次。测定土壤养分, 筛选对弃土场土壤改良效果明显的植物;

(2) 选择紫穗槐与草木樨、黑麦草与白三叶在 3 种不同处理下混播, 重复 1 次。测定土壤养分, 筛选对弃渣土场土壤改良效果明显的植物;

各个小区除施肥不同外, 其他外部条件均保持一致。试验测试指标为: 土壤含水量、有机质、速效氮(硝态氮、铵态氮)、速效磷、速效钾。

3 不同施肥条件下植物小区土壤速效钾含量

钾既是土壤中营养元素的重要组成部分, 也是植物生长不可或缺的元素。速效钾是植物需要的重要

元素, 可以作为一个衡量土壤肥力的重要指标<sup>[13]</sup>。钾能够促进光合作用, 其主要功能与植物的新陈代谢有关。明显提高植物对氮的吸收和利用, 同时有助于作物的抗逆性。有学者指出, 速效钾含量影响着作物的产量和质量, 甚至土壤中速效钾含量的多少可以影响生态环境的安全<sup>[14-15]</sup>。在土壤中, 对植物最有效的钾素就是速效钾, 其含量可以直接供应植物利用的钾含量水平<sup>[15-18]</sup>。前人已经证明, 速效钾对于土壤养分循环方面有着重要意义, 直接反映出了土壤钾含量水平和土壤的肥力情况<sup>[19-21]</sup>。

3.1 土壤 0—10 cm 层速效钾含量

图 2 所示为不同施肥条件下土壤 0—10 cm 层土壤速效钾含量。从图 2 可以看出, 在施肥条件下(有机肥、秸秆)土壤速效钾含量要高于不施肥土壤含量。

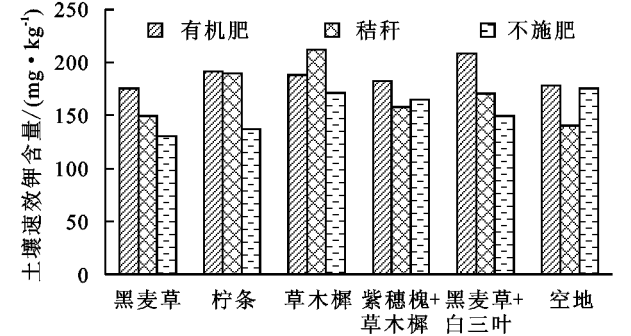


图 2 不同施肥条件下土壤 0—10 cm 速效钾含量

在施有机肥条件下, 与空地(AO)相比, 黑麦草小区土壤速效钾含量有所降低, 减少了 3.96 mg/kg, 减幅为 2.22%。其他小区土壤含量与空地相比均为增加, 其中, 黑麦草+白三叶增加最大为 29.41 mg/kg, 增幅为 16.47%; 紫穗槐+草木樨增加幅度最小, 比空地增加了 4.46 mg/kg, 增幅为 2.50%; 柠条比空地增加 12.39 mg/kg, 增幅为 6.94%; 草木樨增加了 9.73 mg/kg, 增幅为 5.45%。各小区土壤速效钾含量大小顺序为: 黑麦草(208.02 mg/kg) > 柠条(191.00

mg/kg) > 草木樨(188.34 mg/kg) > 紫穗槐 + 草木樨(183.08 mg/kg) > 黑麦草(174.65 mg/kg)。

单播植物土壤速效钾平均含量为 184.66 mg/kg, 比空地增加 6.05 mg/kg; 混播植物土壤速效钾平均含量为 195.55 mg/kg, 比空地增加了 16.94 mg/kg。混播植物改良效果优于单播植物。

采用施秸秆条件下, 所有小区土壤速效钾含量均高于空地(BO)。其含量大小顺序为: 草木樨(212.57 mg/kg) > 柠条(189.63 mg/kg) > 黑麦草 + 白三叶(170.41 mg/kg) > 紫穗槐 + 草木樨(156.85 mg/kg) > 黑麦草(149.53 mg/kg)。其中, 草木樨增长量最多, 比空地增加了 71.94 mg/kg, 增幅为 51.16%; 增幅最小的是黑麦草, 比空地增加了 8.89 mg/kg, 增幅为 6.33%; 柠条增加了 49.00 mg/kg, 增幅为 34.84%; 紫穗槐 + 草木樨增加了 16.22 mg/kg, 增幅为 11.53%; 黑麦草 + 白三叶增加了 29.78 mg/kg, 增幅为 21.17%。

单播植物土壤速效钾平均含量为 183.91 mg/kg, 比空地增加了 43.28 mg/kg; 混播植物土壤速效钾平均含量为 163.63 mg/kg, 比空地增加了 23.00 mg/kg。单播植物对土壤改良效果优于混播植物。

在不施肥条件下, 所有小区土壤速效钾含量均低于空地(CK)。其含量大小顺序为: 草木樨(170.67 mg/kg) > 紫穗槐 + 草木樨(164.59 mg/kg) > 黑麦草 + 白三叶(149.36 mg/kg) > 柠条(136.49 mg/kg) > 黑麦草(130.94 mg/kg)。其中, 减少量最多的是黑麦草, 减少了 45.29 mg/kg, 减幅为 25.70%; 减少量最小的是草木樨, 比空地减少了 5.56 mg/kg, 减幅为 3.15%; 柠条减少了 39.74 mg/kg, 减幅为 22.55%; 紫穗槐 + 草木樨减少了 11.64 mg/kg, 减幅为 6.61%; 黑麦草 + 白三叶减少了 26.87 mg/kg, 减幅为 15.25%。

单播植物土壤速效钾平均含量为 146.03 mg/kg, 比空地减少了 30.20 mg/kg; 混播植物土壤速效钾平均含量为 156.98 mg/kg, 比空地减少了 19.26 mg/kg。在不施肥条件下, 混播植物对土壤改良效果优于单播植物。

### 3.2 土壤 10—20 cm 层速效钾含量

在 3 种不同施肥条件下, 各小区土壤速效钾含量基本持平, 变化不大, 只有在黑麦草 + 白三叶小区内施有机肥条件下, 土壤速效钾含量较高(图 3)。

在施有机肥条件下, 与空地(AO)相比, 只有黑麦草 + 白三叶比空地高, 提高了 59.68 mg/kg, 增幅为 39.01%。其余与空地相比均有所减少, 其中, 草木樨减少最大, 减幅为 13.44%, 减少了 20.56 mg/kg; 紫

穗槐 + 草木樨次之, 比空地减少 17.93 mg/kg, 减幅为 11.72%; 黑麦草减幅最小为 2.54%, 减少了 3.88 mg/kg; 柠条减少了 6.78 mg/kg, 减幅为 4.43%。各小区土壤速效钾含量大小顺序为: 黑麦草 + 白三叶(212.66 mg/kg) > 黑麦草(149.10 mg/kg) > 柠条(146.20 mg/kg) > 紫穗槐 + 草木樨(135.05 mg/kg) > 草木樨(132.43 mg/kg)。

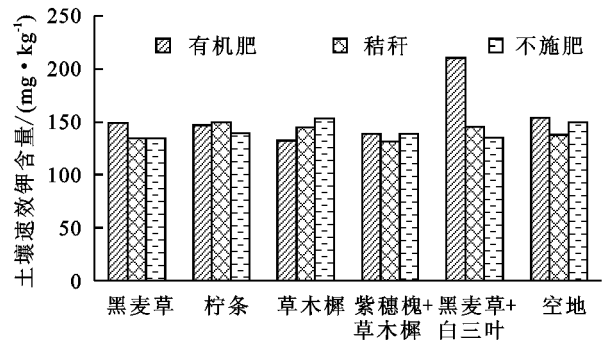


图 3 不同施肥条件下土壤 10—20 cm 速效钾含量

单播植物土壤速效钾平均含量为 142.58 mg/kg, 比空地减少了 10.40 mg/kg; 混播植物土壤速效钾平均含量为 173.86 mg/kg, 比空地增加了 20.88 mg/kg。在施有机肥条件下, 混播植物对土壤改良效果优于单播植物。

在施秸秆条件下, 各小区土壤速效钾含量大小顺序为: 柠条(149.33 mg/kg) > 草木樨(144.26 mg/kg) > 黑麦草 + 白三叶(143.13 mg/kg) > 黑麦草(132.46 mg/kg) > 紫穗槐 + 草木樨(129.69 mg/kg)。其中, 黑麦草比空地(BO)减少了 3.40 mg/kg, 减幅为 2.50%; 紫穗槐 + 草木樨比空地减少了 6.18 mg/kg, 减幅 4.55%; 柠条比空地增加了 13.47 mg/kg, 增幅为 9.91%; 草木樨比空地增加了 8.39 mg/kg, 增幅为 6.18%; 黑麦草 + 白三叶比空地增加了 7.26 mg/kg, 增幅为 5.35%。

单播植物土壤速效钾平均含量为 142.01 mg/kg, 比空地增加了 6.15 mg/kg; 混播植物土壤速效钾含量为 136.41 mg/kg, 比空地增加了 0.55 mg/kg。在施秸秆条件下, 单播植物对土壤改良效果优于混播植物。

在不施肥条件下, 草木樨小区土壤速效钾含量比空地(CK)提高了 5.14 mg/kg, 增幅为 3.46%。其余小区与空地相比均有所减少, 其中, 黑麦草 + 白三叶减小幅度最大为 10.28%, 减少了 15.25 mg/kg; 黑麦草减小幅度次之, 减少了 14.32 mg/kg, 减幅为 9.65%; 柠条减幅最小为 7.03%, 减少了 10.44 mg/kg; 紫穗槐 + 草木樨减少了 11.40 mg/kg, 减幅为 7.68%。各小区土壤速效钾含量大小顺序为: 草木樨(153.48 mg/kg) > 柠条(137.91 mg/kg) > 紫穗槐 + 草木樨(136.95 mg/kg) > 黑麦草

(134.03 mg/kg)>黑麦草+白三叶(133.09 mg/kg)。

单播植物土壤速效钾平均含量为 141.80 mg/kg,比空地减少了 6.54 mg/kg;混播植物土壤速效钾平均含量为 135.02 mg/kg,比空地减少了 13.32 mg/kg。在不施肥条件下,单播植物对土壤改良效果优于混播植物。就土壤速效钾含量与空地相比较而言,在 0—20 cm 内,单播植物与混播植物对土壤改良效果相当。

4 结 论

从表 4 可以看出,在 0—10 cm,10—20 cm 层内,土壤速效钾含量均表现为:有机肥>秸秆>不施肥。在不施肥条件下,同样出现了平均含量低于空地的情况,这也从侧面说明了初期土壤培肥时需要补充植物生长所需的养分。

表 4 土壤 0—20 cm 层土壤速效钾含量

土层/ cm	施肥条件	平均含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	平均—空地/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	增幅/ %
0—10	有机肥	189.02	10.41	5.83
	秸秆	175.79	35.16	25.00
	不施肥	150.41	—25.82	—14.65
10—20	有机肥	155.09	2.11	1.38
	秸秆	139.77	3.91	2.88
	不施肥	139.09	—9.25	—6.24

由以上试验数据发现,施入有机肥和秸秆极大地增加了土壤中有效钾的含量;有机肥处理下各植物平均含量较基土值有所降低,但是仍明显高于空地含量;不施肥处理下各植物平均含量均高于空地,秸秆处理各植物平均含量较基土值也有所增加;3 种处理下平均有效钾含量比较:施有机肥>施秸秆>不施肥,0—10 cm 土层普遍高于 10—20 cm 土层含量。

参考文献:

[1] 谭金芳,韩燕来,介晓磊,等.轻壤质潮土氮肥基追比对小麦产量与品质的影响[J].土壤通报,2003,34(5):436-439.

[2] 宋海星,李生秀.玉米生长空间对根系吸收特性的影响[J].中国农业科学,2003,36(8):899-904.

[3] 张继宏,汪景宽,须湘成,等.覆膜栽培条件下有机肥对土壤氮和玉米生物量的影响[J].土壤通报,1990,21(4):162-166.

[4] 陈欣,李萍萍,章熙谷.苏南地区农田养分循环特征及平

衡调控途径[J].生态农业研究,1997,5(3):10-14.

[5] 张桂兰,宝德俊,王英,等.长期施用化肥对作物产量和土壤性质的影响[J].土壤通报,1999,30(2):64-67.

[6] 王林权,周春菊,王俊儒,等.鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响[J].土壤学报,2002,39(2):268-275.

[7] 王兴仁,张福锁,曹一平,等.养分资源管理的理论和技术及其在小麦玉米高产轮作中的应用[J].中国农业大学学报,2003,8(S1):36-41.

[8] 周晓芬,张彦才,李巧云,等.有机肥料对土壤钾素供应能力及其特点研究[J].中国生态农业学报,2003,11(2):61-63.

[9] 刘义新,韩移旺,唐绅,等.结晶有机肥对土壤供钾能力及钾在烟株的分布特点[J].植物营养与肥料学报,2004,10(1):107-109.

[10] 高照良,彭珂珊.西部地区生态修复与退耕还林还草研究[M].北京:中国文史出版社,2005.

[11] 徐斌.不同植物对黄土高原沟壑区弃土场土壤培肥效应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.

[12] 高霞.不同施肥条件下植物对弃土场土壤改良效果的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.

[13] 张玲娥,双文元,云安萍,等.30 年间河北省曲周县土壤速效钾的时空变异特征及其影响因素[J].中国农业科学,2014,47(5):923-933.

[14] 刘彦随,陈百名.中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究[J].地理研究,2002,21(3):324-331.

[15] 谭德水,金继运,黄绍文,等.长期施钾对东北春玉米产量和土壤钾素状况的影响[J].中国农业科学,2007,40(10):2234-2240.

[16] 范钦桢,谢建昌.长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变[J].土壤学报,2005,42(4):591-599.

[17] 陈钦程,徐福利,王渭玲,等.秦岭北麓不同林龄华北落叶松土壤速效钾变化规律[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1243-1249.

[18] S Zhang, X Zhang, X Liu, et al. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available potassium [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2013,95(3):319-331.

[19] 李小英,段争虎.黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J].土壤通报,2012,43(6):1508-1514.

[20] 高照良,张晓萍,彭珂珊.黄土高原地区淤地坝建设及其规划研究[M].北京:中央文献出版社,2007.

[21] 高照良,张晓萍,彭珂珊.粮食安全问题概论[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009.