

# Changes of Basic Nutrient Elements, Si, Fe<sup>2+</sup> Content in Film-Bottomed Rice Soil in Horqin Sandy Land

Durong Bai, Jinjing Fu, Lin Sun, Ankhbayar Sukhbat, Lei Liang\*

College of Environment, Liaoning University, Shenyang Liaoning  
Email: \*syllshenyang@163.com

Received: Mar. 26<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 10<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 17<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

In order to restore desertified soil, the double-film mulching technology was applied to rice cultivation. Paddy soils planted with this technology from 2014 were selected as research objects. It was found that with the increase in the number of years of application of this technology, the contents of nitrogen, phosphorus, potassium, and organic matter in paddy soils increased. Compared with unrepaired sandy soils in 2014, paddy soils with double-membrane mulch technology increased total nitrogen content by 84% and 116%, total phosphorus content by 87%, 97%, and total potassium in 2018 and 2019, respectively. The contents increased by 93% and 104%, and the organic matter contents increased by 187% and 203%, respectively. After five years of double-mode rice planting, the effective silicon content in the soil reached 60.4 mg/kg, an increase of 15% compared to 2014, but the growth rate was slower and far below the critical silicon deficiency threshold of 100 mg/kg, which is a silicon deficiency soil. Meanwhile, the ferrous content reached 69 mg/kg, an increase of 68% over 2014. The ferrous content in the soil will reach a peak in September, about 151.8 mg/kg, which is lower than the threshold of 300 mg/kg for ferrous poisoning. However, during the planting process of double-film covered rice, air tightness, ferrous accumulation accumulates year by year, and the growth is fast, which requires regular monitoring. The results show that the application of double-film mulching technology can repair desertified soil, gradually bring the nutrients in the soil to the level of normal soil, restore the desertified soil, and provide the necessary nutrients for the next generation of film-covered rice. For the lack of effective silicon and ferrous iron in the soil, the problem of rapid growth can be solved by applying fermented rice husks.

## Keywords

Double-Film Rice, Soil Restoration, Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Organic Matter, Effective Silicon, Ferrous

# 科尔沁沙地衬膜水稻土壤基本营养元素, Si, Fe<sup>2+</sup>含量变化

\*通讯作者。

白都荣, 付金晶, 孙琳, 安迪, 梁雷\*

辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

Email: syllshenyang@163.com

收稿日期: 2020年3月26日; 录用日期: 2020年4月10日; 发布日期: 2020年4月17日

## 摘要

为达到修复荒漠化土壤的目的, 自2014年起, 在科尔沁奈曼旗沙地应用双膜覆盖技术种植水稻。对该稻田中的土壤进行研究, 对比未经修复的沙地和修复后稻田土壤中氮、磷、钾、有机质、有效硅和亚铁的含量及变化。结果表明, 双膜覆盖水稻技术的应用, 使土壤中氮、磷、钾、有机质含量明显增加, 与2014年未修复沙地土壤相比, 应用双膜覆盖技术稻田土壤在2018年和2019年总氮含量分别增加了84%、116%, 总磷含量分别增加了87%、97%, 总钾含量分别增加93%、104%, 有机质含量分别增加了187%、203%。经过5年的双膜覆盖水稻种植, 稻田土壤中有效硅含量较2014年增长了15%, 达到60.4 mg/kg, 但增长速率较慢, 且远低于缺硅临界值100 mg/kg, 属于缺硅土壤; 同时, 稻田土壤中亚铁含量较2014年增长了68%, 达到69 mg/kg。土壤中亚铁含量会在9月份达到峰值, 约为151.8 mg/kg, 低于亚铁毒害临界值300 mg/kg。但双膜覆盖水稻种植过程中不透气, 亚铁逐年积累, 增长较快, 需要定时监测。研究表明在荒漠化土壤使用双膜覆盖技术种植水稻可以使土壤中基本营养元素得到有效的增加, 使荒漠化土壤逐步修复。对于土壤中缺乏有效硅和亚铁浓度增长较快的问题, 可以通过施加发酵稻壳来解决。

## 关键词

双膜覆盖水稻, 土壤修复, 氮, 磷, 钾, 有机质, 有效硅, 亚铁

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土地荒漠化是因自然环境变化和人类活动导致的植被退化, 生态系统被破坏的现象[1], 位列世界六大生态问题之首[2]。建国以来, 我国土地荒漠化面积不断增加, 据调查结果显示, 至2016年, 我国已有27.1%的土地发生了不同程度的荒漠化现象[3]。荒漠化破坏基础设施, 阻碍经济发展, 恶化生态环境, 威胁人们的生命财产安全[4]。

本文利用双膜覆盖技术改造荒漠化土壤并种植水稻, 这样不但能固定沙化土壤, 并通过水稻的生物作用和施加有机肥等人工干预修复荒漠化土壤, 又将无法利用的荒漠变为可以耕作的田地, 增加耕地面积。本文将自2014年起进行双膜覆盖改造, 至2019年已进行5年水稻种植试验的荒漠土壤与试验地附近未修复土壤进行采样测定, 研究氮、磷、钾、有机质、有效硅、亚铁等影响水稻生长元素的含量及变化, 确定土壤修复成果, 为下一步研究工作做好准备。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 衬膜技术

水稻衬膜技术指在沙层下铺设塑料衬膜以防止水肥流失, 将衬膜上的沙土作为基质种植作物, 并利

用科学的水肥管理措施,使作物缩短生长周期并提高产量的新技术[5]。衬膜水稻较常规水稻水肥消耗减少 10%~30%,并能提早一周收获;地下衬膜寿命长达 10 年[6]。20 世纪 90 年代,奈曼旗试验种植的 1.5 hm<sup>2</sup> 衬膜水稻,产量达到 9750 kg/hm<sup>2</sup> [7]。

## 2.2. 覆膜技术

水稻覆膜技术是将塑料薄膜铺设在稻田土壤表面,以达到减少水分和氮肥挥发的目的[8],能够有效减少水肥消耗和降低劳动力成本[9]。20 世纪 70 年代,我国学者引进了这项新技术,增产效果十分明显[10]。2007 年有研究人员在安岳县种植 4 hm<sup>2</sup> 覆膜水稻,也达到了不错的效果[11]。

## 2.3. 双膜覆盖技术

双膜覆盖技术是指将荒漠化土壤进行工程改造以达到能够种植水稻的目的。通过地下衬膜,地上覆膜的方式减少水肥流失,保证水稻在沙土中的正常生长。常规水稻每个生长周期需水量为 21,000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,衬膜水稻为 12,000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> [12],而双膜覆盖水稻仅为 7500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。与其他生态修复技术相比,双膜覆盖技术修复速率快,无肥料渗漏,节约淡水资源,还能收获农作物,产生经济价值。

## 2.4. 研究区域概况

课题组自 2014 年起于内蒙古通辽市奈曼旗设立试验田用于双膜覆盖技术的研究,奈曼旗地处科尔沁沙地南部,主要以风蚀堆积沙地为主,东经 120°39',北纬 42°51',大陆性季风气候,年平均降水量 335.9 mm,年平均气温 6.8℃,年最大蒸发量 1104.6 mm,最小蒸发量 871.5 mm。

## 2.5. 土壤样品采集

本研究在 2014 年进行双膜覆盖工程改造前于试验地采取土样,以确定未修复沙地土壤中各营养元素底值。并分别于 2018 年和 2019 年的 5 月、10 月在试验田及其附近环境相似的未修复荒漠土壤中采样。每个采样点选取 4 个 10 m × 10 m 的样方,以梅花法进行采样,采取深度 0~30 cm 得土壤样品,剔除石子等杂质后阴干,研磨过筛,以备实验测定使用。

## 2.6. 测定方法

土壤总氮用开氏消煮法测定,总磷用碳酸钠熔融法测定,总钾用氢氧化钠熔融法测定,有机质用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定,有效硅用柠檬酸提取-钼蓝比色法测定,亚铁用邻菲罗啉比色法测定[13]。

## 3. 结果与分析

通过对土样中氮、磷、钾、有机质等基本营养元素的测定可以得知荒漠化土壤修复速率及修复成果[14][15]。而硅是水稻的重要元素组成,土壤中有效硅的含量直接影响到水稻的产量,有效硅的测定有助于做出水稻增产计划[16]。同时,由于双膜覆盖水稻种植过程中土壤不与空气接触,导致土层缺氧,还原性强,可能会导致亚铁浓度升高,毒害水稻根系,故对土壤中亚铁浓度进行测定分析是十分必要的。

### 3.1. 土壤总氮含量变化

氮素是植物体不可缺少的重要营养元素[17],占植物体比重很大[18],土壤中氮素含量水平直接决定其肥力水平[19],它在人类农业和自然生态平衡中都有着重要的作用[20]。通过对比未进行改造修复的沙地土壤和已进行双膜覆盖改造及数年水稻种植的稻田土壤中各采样点总氮含量平均值,可知双膜覆盖水稻种植对荒漠化土壤中总氮含量的影响。由图 1 可知,2014 年未进行双膜覆盖改造的沙地土壤中总氮含量为 0.019%,而双膜覆盖水稻田中的土壤经过数年的种植修复,2018 年稻田土壤中总氮含量为 0.035%,

较未修复土壤增长了 84%；2019 年稻田土壤中总氮含量为 0.041%，较未修复土壤增长了 116%。实验数据表明，通过双膜覆盖水稻种植可使荒漠化土壤中总氮含量明显增加，土壤肥力得到有效提升，为植物在土壤中生长提供必要的营养元素。

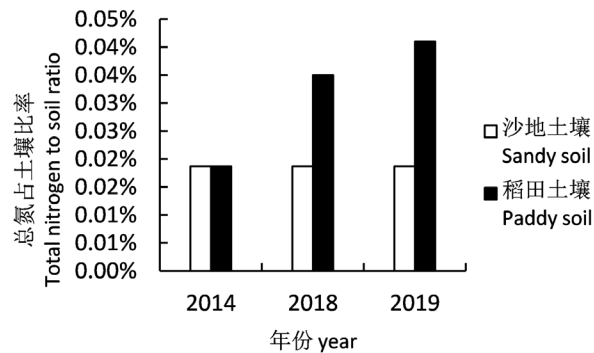


Figure 1. Total nitrogen to soil ratio

图 1. 总氮占土壤比率

### 3.2. 土壤总磷含量变化

磷能够促进植物根系发育，调节代谢过程，增强抗旱抗旱能力，植物的生长发育离不开磷[21]。通过对比未进行改造修复的沙地土壤和已进行双膜覆盖改造及数年水稻种植的稻田土壤中各采样点总磷含量平均值，可知双膜覆盖水稻种植对荒漠化土壤中总磷含量的影响。由图 2 可知，2014 年未进行双膜覆盖改造的沙地土壤中总磷含量为 22.07 mg/kg，而双膜覆盖水稻田中的土壤经过数年的种植修复，2018 年稻田土壤中总磷含量为 41.33 mg/kg，较未修复土壤增长了 87%；2019 年稻田土壤中总磷含量为 43.56 mg/kg，较未修复土壤增长了 97%。实验数据表明，通过双膜覆盖水稻种植可使荒漠化土壤中总磷含量明显增加，为土壤中植物提供生长必要的营养元素。

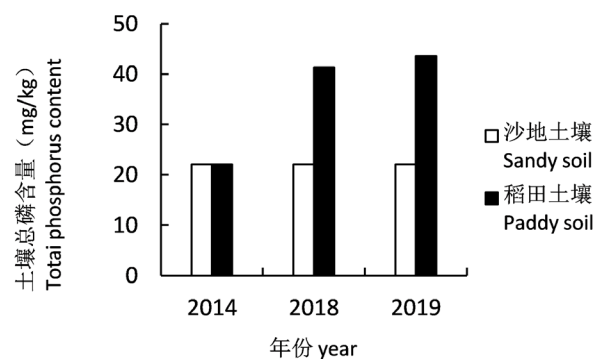


Figure 2. Total phosphorus content

图 2. 总磷含量

### 3.3. 土壤总钾含量变化

钾能够增强植物抗逆性，促进其光合作用和对氮磷的吸收[22]，植物主要通过根系从土壤中吸收钾[23]。通过对比未进行改造修复的沙地土壤和已进行双膜覆盖改造及数年水稻种植的稻田土壤中各采样点总钾含量平均值，可知双膜覆盖水稻种植对荒漠化土壤中总钾含量的影响。由图 3 可知，2014 年未进行双膜覆盖改造的沙地土壤中总钾含量为 6.25 g/kg，而双膜覆盖水稻田中的土壤经过数年的种植修复，2018

年稻田土壤中总钾含量为 12.05 g/kg,较未修复土壤增长了 93%;2019 年稻田土壤中总钾含量为 12.75 g/kg,较未修复土壤增长了 104%。实验数据表明,通过双膜覆盖水稻种植可使荒漠化土壤中总钾含量明显增加,从而促进水稻对钾的吸收。

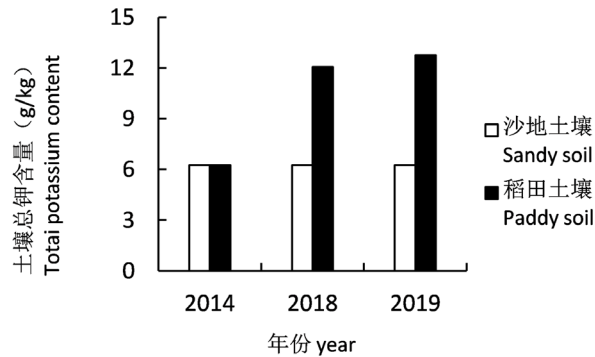


Figure 3. Total potassium content

图 3. 总钾含量

### 3.4. 土壤有机质含量变化

有机质是土壤中最活跃的部分,是土壤肥力的基础[24],直接影响农作物的产量[25]。有机质不但能帮助土壤蓄水保肥,改善土壤结构和理化性质[26],还能通过矿质化作用分解出大量营养元素和微量元素[27]。在荒漠化土壤修复的过程中,有机质含量更是土壤修复程度的直接体现[28]。通过对比未进行改造修复的沙地土壤和已进行双膜覆盖改造及数年水稻种植的稻田土壤中各采样点有机质含量平均值,可知双膜覆盖水稻种植对荒漠化土壤中有机质含量的影响。由图 4 可知,2014 年未进行双膜覆盖改造的沙地土壤中有有机质含量为 3.0 g/kg,而双膜覆盖水稻田中的土壤经过数年的种植修复,2018 年稻田土壤中有有机质含量为 8.6 g/kg,较未修复土壤增长了 187%;2019 年稻田土壤中有有机质含量为 9.1 g/kg,较未修复土壤增长了 203%。实验数据表明,通过双膜覆盖水稻种植可使荒漠化土壤中有机质含量明显增加,改善土壤结构和理化性质,优化植物生长环境。

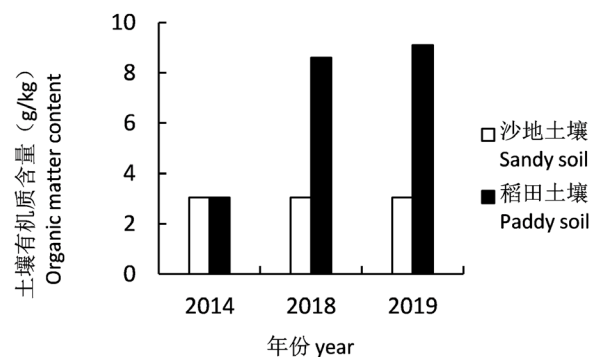


Figure 4. Organic matter content

图 4. 有机质含量

### 3.5. 土壤有效硅含量变化

硅是植物体重要组成元素[29],水稻在生长发育过程中尤其离不开硅。植物吸收的硅能使其表皮细胞硬化,茎、叶挺拔平直,增加光合反应面积,提高光合效率[30]。硅能增强植物体的通气组织,强化根系

的氧化能力[31], 加速植物根部发育, 促进植物对于营养物质的吸收, 提高植物的抗病虫害能力[32]; 同时, 硅的吸收还能改善植物体矿质养分状况, 增加农作物产量[33]。一般认为, 土壤中有效硅含量低于 100 mg/kg 为缺硅土壤[34]。

通过测量分析未进行改造修复的沙地土壤和已进行双膜覆盖改造及数年水稻种植的稻田土壤中各采样点有效硅含量平均值, 可知双膜覆盖水稻种植对荒漠化土壤中有效硅含量的影响。由图 5 可知, 未进行双膜覆盖改造的沙地土壤中有效硅含量为 52.5 mg/kg, 而双膜覆盖水稻田中的土壤经过 5 年的种植, 有效硅含量达到 60.4 mg/kg, 增长了 15%。有效硅含量的增长, 说明说明双膜覆盖水稻逆转了土壤荒漠化过程, 荒漠化土壤开始修复, 但增长速率较慢, 土壤缺硅情况十分严重。需要改进种植方案, 加强硅素的补充。

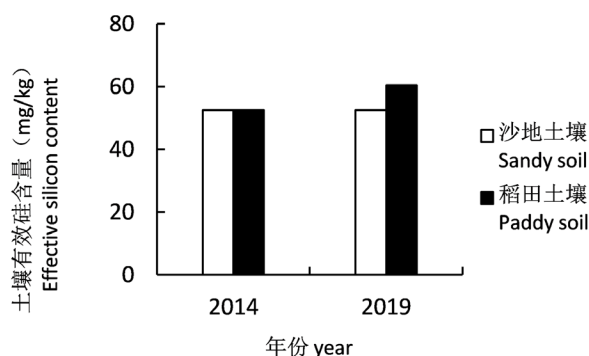


Figure 5. Effective silicon content

图 5. 有效硅含量

### 3.6. 土壤亚铁含量变化

由于双膜覆盖水稻种植过程中土壤不与空气接触, 导致土层缺氧, 还原作用较强, 容易产生亚铁和还原态硫等还原性物质, 当还原性物质积累过多便会对水稻产生毒害作用[35]。亚铁作为还原性土壤对水稻的一种主要障碍因子[36], 占土壤还原性物质总量的 60%~80%左右[37]。随着亚铁在田中不断累积, 对水稻的毒害逐渐加强, 水稻遭受亚铁毒害时, 生物量和产量明显下降, 严重时减产 30%~60% [38]。所以实时监控调整稻田中亚铁含量对水稻的正常生长有很重要的现实意义。

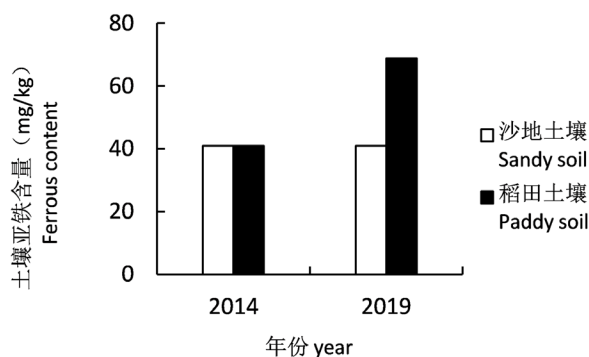


Figure 6. Ferrrous content

图 6. 亚铁含量

通过测量分析双膜覆盖水稻田中各采样点亚铁含量平均值, 可监测种植过程中稻田中亚铁含量增长速度。由图 6 可知, 未进行双膜覆盖改造的沙地土壤中亚铁含量为 41 mg/kg, 而双膜覆盖水稻田中的土

壤经过 5 年的种植, 亚铁含量达到 69 mg/kg, 增长了 68%。袁大刚[39]等经过研究发现, 在水稻田中, 未在淹水状态下土壤中的亚铁含量基本保持不变, 当 5 月份开始种植水稻淹水时, 土壤中亚铁含量开始逐渐积累, 到 9 月份水稻成熟收获前达到峰值, 可达未淹水时亚铁含量的 220%。本次实验用于测定亚铁含量的土壤于 10 月份采样, 是为未淹水期, 可以推断, 当年 9 月土壤中亚铁含量达到峰值时约为 151.8 mg/kg。国内外研究学者一致认为, 当土壤中亚铁含量达到 300 mg/kg 时, 就会对水稻产生毒害作用[40]。说明目前稻田土壤中亚铁含量峰值还未达到毒害水稻的临界值。但双膜覆盖水稻种植过程中不透气, 亚铁逐年积累, 增长较快, 需要定时监测。

#### 4. 讨论

科尔沁沙地荒漠化土壤经过 5 年的双膜覆盖水稻工程修复后, 其中基本营养元素均有显著提升, 有机质增长比例最高, 较 2014 年增长了 203%, 荒漠化修复初见成效。而土壤中有效硅仅仅增长了 15%, 且仍处于严重缺硅的范围, 可见目前采取的修复措施对土壤有效硅增长影响有限, 有效硅含量过低可能是导致试验地双膜覆盖水稻产量较低的主要原因之一, 采取新的方法以加快土壤中有效硅含量增加是下一步研究的重点。双膜工程改造后的土壤耕层透气性差, 亚铁积累速度快, 在加强监测的同时也应通过科学的方法对其进行控制, 预防亚铁毒害水稻现象的发生。

水稻中硅含量丰富, 其地上部分干物质中硅含量占总干物质重量的 10%左右, 其中以稻壳中含量最多[41]; 陈娜[42]发现, 发酵后的稻壳对土壤中的亚铁有吸附作用, 且吸附效果稳定。我们可以改进秸秆还田技术, 将稻壳发酵后定量施入土壤, 既能增加土壤中有效硅的含量, 又能吸附土壤中的亚铁, 控制亚铁浓度, 同时还能增加氮、磷、钾、有机质等土壤基本营养元素的含量, 提高修复速率。

#### 5. 结论

应用双膜覆盖技术种植水稻以修复荒漠化土壤, 土壤总氮、总磷、总钾和有机质含量呈不断增加的趋势。而土壤中有效硅增长速率较慢, 且远低于缺硅临界值, 属于缺硅土壤; 同时, 亚铁含量低于亚铁毒害临界值。但双膜覆盖水稻种植过程中不透气, 亚铁逐年积累, 增长较快, 需要定时监测。

总的来说, 应用双膜覆盖水稻技术修复荒漠化土壤, 土壤中基本营养元素逐步增加, 荒漠化土壤得到修复, 同时还可以产出优质稻米, 产生经济效益。对于土壤中缺乏有效硅和亚铁浓度增长较快的问题, 可以通过施加发酵稻壳来解决。

#### 基金项目

辽宁省教育厅 2017 年度高等学校基本科研立项: 双膜覆盖沙漠水稻种植技术研究(LFW201703)。

#### 参考文献

- [1] 朱震达. 土地荒漠化问题研究现状与展望[J]. 地理研究所, 1994, 13(1): 104-113.
- [2] 屠志方. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J]. 林业资源管理, 2016(1): 1-5.
- [3] 蒋德明, 刘志民, 寇振武. 科尔沁沙地荒漠化及生态恢复研究展望[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1695-1698.
- [4] 董光荣, 吴波, 慈龙骏, 等. 我国荒漠化现状、成因与防治对策[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 318-332.
- [5] 张雄, 山颖, 张继平. 沙地衬膜水稻施肥效应与技术研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 139-142.
- [6] 池海清. 沙地衬膜栽培水稻技术研究[J]. 现代农业科技, 2008(18): 172.
- [7] 王贵平. 沙地衬膜种稻技术[J]. 现代农业, 1995(10): 17-18.
- [8] 刘洋, 张玉焯, 王学华. 水稻覆膜栽培研究现状与展望[J]. 湖南农业科学, 2009(2): 55-58.
- [9] 吴炳祥. 水稻覆膜栽培技术[J]. 现代农业科技, 2014(10): 31.

- [10] 吕世华, 刘水富, 袁江. 关于覆膜水稻推广应用“白色污染”[J]. 四川农业科技, 2009(2): 54-55.
- [11] 袁亮. 覆膜水稻在安岳县鸳大镇[J]. 四川农业科技, 2009(2): 44.
- [12] 王婷. 榆林沙区衬膜水稻栽培技术与构建[D]: [硕士学位论文]. 陕西: 西北农林科技大学, 2006.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 82-190.
- [14] 王磊, 香宝, 苏本营, 等. 城市污泥应用于我国北方沙地生态修复的探讨[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(5): 484-492.
- [15] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 生态环境学报, 2002, 11(2): 202-205.
- [16] 郭楠. 煤矿废弃地不同修复模式下土壤理化性质及生态化学计量学研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [17] 邢瑶, 马兴华. 氮素形态对植物生长影响的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(2): 109-117.
- [18] 王平, 陈举林. 植物氮素吸收过程研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016(1): 33-35.
- [19] 袁静, 季平扬, 袁艺. 修正的凯氏法测定土壤中的总氮[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(2): 143-146.
- [20] 郭小颖. 开氏消煮-常量蒸馏-滴定法测定土壤中总氮量[J]. 环境研究与监测, 2011(2): 33-35.
- [21] 郑志松, 王公卿. 磷素对小麦生长发育、产量和品质形成的影响[J]. 河南农业(17): 16-17.
- [22] 刘会玲, 陈亚恒, 段毅力, 等. 土壤钾素研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(z1): 66-68.
- [23] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 548-553.
- [24] 宋春雨, 张兴义, 刘晓冰, 等. 土壤有机质对土壤肥力与作物生产力的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(3): 357-362.
- [25] 张治国, 马福武. 土壤有机质对坡耕地土壤侵蚀及作物产量的影响[J]. 中国水土保持, 1997(8): 11-13.
- [26] 李文芳, 杨世俊, 文亦夫, 等. 土壤有机质的环境效应[J]. 环境与可持续发展, 2004(4): 31-33.
- [27] 文启孝. 土壤有机质的组成、形成和分解[J]. 土壤, 1984, 16(4): 3-11.
- [28] 黄元仿, 周志宇, 苑小勇. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2776-2781.
- [29] 何珊琼, 孟赐福, 黄张婷, 等. 土壤植硅体碳稳定性的研究进展与展望[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(3): 506-515.
- [30] 贾国涛, 顾会战, 许自成, 等. 作物硅素营养研究进展[J]. 山东农业科学, 2016, 48(5): 153-158.
- [31] 饶立华, 覃莲祥, 朱玉贤, 等. 硅对杂交稻形态结构和生理的效应[J]. 植物生理学通讯, 1986(3): 22-26.
- [32] 田福平, 陈子萱, 苗小林, 等. 土壤和植物的硅素营养研究[J]. 山东农业科学, 2007(1): 81-84.
- [33] 王飞, 秦方锦, 庄亚其, 等. 宁波市水稻土壤硅素丰缺指标体系研究初报[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1491-1495.
- [34] 张冬明, 谢良商, 肖彤斌, 等. 海南岛水稻田有效硅含量及其影响因素分析[J]. 现代农业科技, 2017(8): 197-198+206.
- [35] 柴娟娟, 廖敏, 徐培智, 等. 我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 286-290.
- [36] 胡彬, 吴平. 水稻依赖抗坏血酸  $H_2O_2$  清除系统在抗铁毒中的作用[J]. 植物生理学报, 1999, 25(1): 43-48.
- [37] 于天仁, 刘畹兰. 水稻土中氧化还原过程的研究(III)氧化还原条件对水稻生长的影响[J]. 土壤学报, 1957, 5(4): 292-304.
- [38] 李达模, 唐建军, 苏以荣, 等. 湘中、湘东地区早籼稻耐土壤潜育性评价[J]. 植物科学学报, 1992, 10(2): 139-151.
- [39] 袁大刚, 谭海燕, 程伟丽, 等. 川西漂洗水稻土亚铁时空分布对土地利用/覆被变化的响应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 128-135.
- [40] 林海波, 朱青, 陈正刚, 等. 冷浸田亚铁对水稻毒害作用及改良措施[J]. 山地农业生物学报, 2015, 34(2): 86-90.
- [41] 张超. 硅制剂对水稻生长及土壤养分有效性的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [42] 陈娜. 冷浸田亚铁和还原态硫障碍因子致毒机理及治理初探[D]: [硕士学位论文]. 浙江: 浙江大学, 2014.