

# Study on Soil Nutrient Activation Process by Different Bands of Light

Yangjie Lu<sup>1,2,3,4</sup>, Zhen Guo<sup>1,2,3,4</sup>, Yike Wang<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>ShaanXi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi  
Email: 995915203@qq.com, \*15719296643@163.com

Received: Dec. 4<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2019; published: Dec. 30<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

Illumination can activate the soil nutrient elements from the original inert state, thereby reducing the use of fertilizers in the production process. In this study, the effects of different bands of light were studied by using the indoor illumination experiment method, the illumination band set to visible light, infrared light and ultraviolet light, and the soil placed in the dark as a control. The results showed that: the first week of different bands of light increased the total nitrogen content of the soil, and the total nitrogen content increased by 50% in the first week; the infrared, ultraviolet and visible light increased the available potassium content of the soil. The effect of ultraviolet light on the activation of soil available potassium is more obvious; under different light conditions, the effective phosphorus content of the soil is all higher than the initial effective phosphorus content by 100%, and the maximum increase is close to 200%; infrared, ultraviolet and visible light have the effect of reducing the content of active organic carbon in the soil. Experiments have shown that light has an activation effect on the components in the soil and has further research value.

## Keywords

Soil Nutrient, Light, Activation

# 不同波段光照对土壤养分活化过程研究

卢垟杰<sup>1,2,3,4</sup>, 郭 振<sup>1,2,3,4</sup>, 汪怡珂<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>3</sup>自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

\*通讯作者。

<sup>4</sup>陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安  
Email: 995915203@qq.com, 15719296643@163.com

收稿日期: 2019年12月4日; 录用日期: 2019年12月23日; 发布日期: 2019年12月30日

## 摘要

光照过程能够使得土壤养分元素从原来的惰性状态被激活, 通过研究土体活化技术, 加速土壤中养分的转化效率, 从而降低生产过程中化肥的使用, 进一步减少化肥的过量使用所带来的土壤污染问题。本研究以通过室内光照实验方法, 设定光照波段为可见光、红外光、紫外光, 以放置在暗处的土壤为对照, 研究不同波段光照对于土壤养分活化过程的影响。结果表明: 不同波段光照首周对于土壤全氮含量的提升较高, 全氮含量首周均提升50%; 红外、紫外、可见光三种光照对土体速效钾含量均有增加的作用, 特别是紫外光对于土壤速效钾的活化作用明显; 在不同波长光照情况下, 土壤有效磷含量较初始有效磷含量提升效果均在100%之上, 最大提升量接近200%; 红外、紫外、可见光光照对土体活性有机碳含量均有降低的作用。实验结果在土地复垦和土壤改良等方面具有重要参考意义。

## 关键词

土壤养分, 光照, 活化

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

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

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



Open Access

## 1. 引言

人类生存与发展离不开土地[1]。我们国家是人口大国, 人多地少的矛盾始终是现代化进程中的一个带有全局性、战略性的重大问题。我国人均耕地面积不到世界平均水平的一半, 且有 2/3 以上的耕地是中低产田[2], 在中低产田土体中常常出现某些营养元素的缺乏或土体结构不良而影响植物正常生长[3], 具有很大的增产潜力[4]。光照是作物进行光合作用、并赖以生长的重要环境要素; 而养分则是作物生长的物质基础, 作物对养分的吸收和利用, 有赖于其生长状况所确定的对养分的需要及其吸收能力。在一定的光照变化范围内, 作物的光合速率和生长随光照的改变而改变, 因而对养分的需要量亦随之增加、且吸收能力增强, 其同时也必将会因此影响土壤的养分状况。光照的改变, 将最终导致土壤-植物系统中养分供求关系的变化, 并将在很大程度上决定作物的肥料需要量、需肥比例和相应的所采取的施肥技术。

土壤中的总氮、有效磷、速效钾及活性有机碳, 均为表征土壤肥力的重要指标。土壤中的氮素来源于, 被微生物固化的空气中的氮、随雨水和灌溉水带入土壤的氮和使用肥料, 然而, Benjamin Z. Houlton 研究表明, 植物、藻类和动物死亡后沉积在古代海洋的底部, 经过很长时间, 分解出的氮会进入到几种沉积岩中, 土壤和植物体内多达 1/4 的氮元素来自于基岩(bedrock, 指风化层之下的完整岩石) [5]。土壤磷来源主要有两种途径: 土壤母质和大气干湿沉降, 磷灰石构成了磷的巨大储备库, 含磷灰石岩石的风化, 将大量磷酸盐转交给了陆地上的生态系统[6]。土壤矿物钾是指土壤中原生矿物和次生矿物中深受矿物晶格结构束缚的钾[7], 主要存在于云母(白云母、黑云母、金云母)和长石(正长石、微斜长石)中, 经过

风化后即可释放出来供植物利用[8]。土壤有机碳循环是指有机碳进入土壤,并在土壤微生物(包括部分动物)的参与下分解和转化形成的碳循环过程。进入土壤的有机碳主要包括植物和动植物残体,土壤中的有机碳包括土壤腐殖质、土壤微生物及其各级代谢产物的总和[9]。土壤有机碳的分解与转化主要受外源有机物的化学组成、土壤水分条件、温度、质地和土壤 pH 等因素的影响[10]。国内外均展开了光照与土壤养分关系的相关研究,聂三安等[11]通过选取亚热带区 4 种典型稻田和旱地土壤,研究土壤有机碳(SOC)及其活性组分(可溶性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC))对光照和黑暗条件的响应,发现光照显著提高了土壤 DOC 含量。曾希柏等[12]试验表明:光照强度的变化将导致土壤养分状况的差异。不同肥力的 3 种紫色土,其养分含量受光照强度变化影响的状况是,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量有显著增加。矿物钾能够不断释放出来供作物吸收[13][14][15]。梁成华等[16]实验证实,黑云母的生物有效性不低于化学钾肥,而在保持土壤速效钾水平方面,黑云母则比化学钾肥要优越。于航等[17]将采自重庆市涪陵区消落带的沉积物、水稻土、紫色土移至实验室内进行磷释放模拟试验,在不同模拟光照强度下,总磷均随光照强度的升高而增加。张海军等[18],通过对盐碱地的观测,揭示了光照情况下有效磷向缓效磷转化的过程。

土壤中存在大量的未被利用的养分,本文以具有代表性的关中壤土为研究对象,设定不同光照波段的长期光照试验,进行长期光照试验,并定期采样,探究了壤土在不同波段光照情况下,土壤总氮,有效磷,速效钾及有机碳随时间的变化规律,探究土壤在光照情况下的养分变化规律,从而为光照活化土体的机理及应用研究,奠定研究基础。

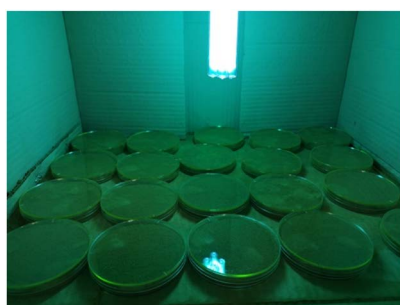
## 2. 材料与方法

### 2.1. 供试材料

试验土样采集自在陕西省富平县中试基地(东经  $109^\circ 12' 10''$ , 北纬  $34^\circ 42' 31''$ )表层 0~15 cm,各土样均按 S 形线路随机选取 5 个采样点采集,将各土样混合均匀摊放在干净地面上,挑拣出可见的动植物残体,室内避光自然风干。风干后的土壤过 1 mm 筛,分别用于土壤基本理化性质测定、室内光照试验。测定土壤养分初始含量,其中全氮含量 0.06 g/kg,速效钾 4.08 mg/kg,有效磷 3.94 mg/kg,活性有机碳 3.22 g/kg。

### 2.2. 试验方法

该实验在不透光纸箱中进行,纸箱尺寸为  $65 \times 65 \times 50$  (cm),纸箱的三边和顶部均用加厚铝箔包好,防止环境中其它杂质光线射入箱体。如图 1,纸箱内放置不同波长的 LED 灯,模拟不同波长太阳光源,灯泡距样品台 20 cm,光照强度为  $1.14 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (根据 LED 灯参数选择),使光反应箱内温度维持在  $28^\circ\text{C} \pm 1.5^\circ\text{C}$ 。样品放在直径 10 cm 培养皿中,培养皿高度 3 cm,控制实验土壤装填高度与培养皿高度相平,防止厚度对于试验结果产生影响。



(a) 紫外光照反应箱



(b) 红外光照反应箱

Figure 1. Light reaction box  
图 1. 光照反应箱

## 2.3. 测定方法

### 2.3.1. 采样方式

采样时间为2018年3月2日至6月22日，每周采样一次，共计采样17周，每次采样取出一个培养皿，将培养皿中实验土壤取出，倒入密封袋内保存。

### 2.3.2. 样品检测

速效磷含量采用0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提比色法测定；速效钾含量采用NH<sub>4</sub>Ac 浸提火焰光度法测定；土壤全氮含量用2 mol/L KCl 溶液浸提(水、土比为5:1)，用全自动间断化学分析仪(cleverchem200，德国)测定[19]。

### 2.3.3. 数据处理

实验每个处理设个平行，试验结果均以平均值表示，采用统计软件对数据进行统计检验及方差分析，数据多重比较采用 Turkey 法，运用 Excel 绘制相关图表。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 可见、紫外、红外光照对全氮的活化作用

未进行光照处理的土样全氮含量为0.06 g/kg，由图2为可见光照射17周情况下的全氮含量变化，在可见光照射首周，全氮含量达到0.09 g/kg，相比于未经光照处理的土壤提高50%，提升效果明显，随着可见光照时间的增长，土壤全氮含量，并未随时间呈现线性增长，反而呈现出不断波动的变化特征，可能首周土壤中的全氮在光照作用下活化，土壤母质中的氮素在光照的作用下，活化为土壤中的无机氮，不稳定的无机氮不断分解形成氮气，土壤全氮含量因此一直处于波动的状态[20]。土壤全氮含量在第5周出现第一个峰值0.095 g/kg，相较于未经照射土壤提升58.33%，相较于首周仅提升8.33%，随后在第13周出现第二个峰值0.1036，相较未经照射土壤全氮含量提升76.2%，相较于首周提升26.2%，随后全氮含量在出现峰值后又继续降低，可能由于在光照能量积累，及全氮的释放需要较长时间过程，土壤中不稳定氮的分解，仍在持续进行，因此全氮含量在出现峰值后又继续降低，对于土壤全氮而言，可见光照射对其的活化作用主要在首周内。紫外光对于土壤全氮的活化作用与可见光相似，首周全氮含量增加50%，随后在0.08~0.1范围内不断波动保持平稳，由于紫外光光照过程中的能量的累计效应，全氮活化

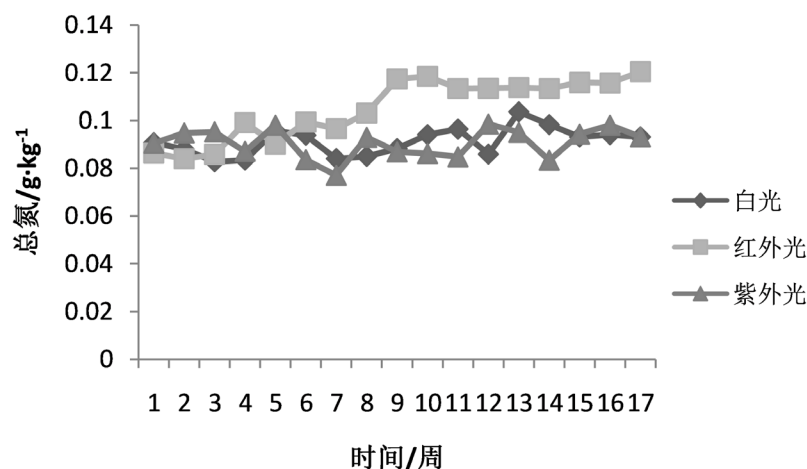


Figure 2. The effect of visible, ultraviolet and infrared light on soil total nitrogen  
图2. 可见、紫外、红外光对土体全氮的影响

的过程既是全氮的累积过程，也是一个氮动态平衡的过程，在第 5 天全氮含量达到峰值，消耗大量的土壤潜在氮，随后需要的积累时间变长，因此，紫外光活化土体全氮分别在第 5 周和第 12 周达到峰值，由此可以推测，可见光对于全氮的提升效果，可能主要是紫外光的影响导致的；红外光对于土壤全氮的影响与可见光、紫外光不同，红外光对于土壤全氮的影响呈现持续上升的趋势，随着紫外光照时间的增加，土壤全氮含量也随之增加，虽然在第 2 周、第 5 周、第 7 周均有不同程度下降，但整体的趋势仍为随光照时间增长而增长，并在 17 周达到最大值 0.12 g/kg，相较于初始含氮量增加 100%，活化提升效果明显，红外光是以热量的方式来影响土壤中的全氮含量的，由于光照活化装置较为密闭，在光照过程中，土壤温度较高，因此，相比较于紫外光与白光，红外光的活化提升效果更加明显。

### 3.2. 可见、紫外、红外光照对速效钾的活化作用

未进行光照处理的土样速效钾含量为 4.08 mg/kg，可见光对于土壤速效钾的活化作用并不明显，在可见光照首周，土壤速效钾含量为 4.34 mg/kg，速效钾含量提升 0.26 mg/kg，提高 6.37%，随着光照时间的增长，土壤速效钾含量提升，并出现第 3 天、第 5 天及第 12 天三个峰值，分别为 4.64 mg/kg、4.64 mg/kg、5.21 mg/kg，分别提升 13.7%、13.7%、27.7%，其活化过程，事实上，是一个速效钾含量逐渐增大的过程，第 3 天、第 5 天，出现的小的峰值为速效钾含量攀升过程的动态波动，由图可知，在红外光、紫外光照射下，仍然存在部分较小的峰值，第 12 天出现的峰值同样为可见光照 17 周的最大值，在达到最大值后开始平缓，在光照 12 天后，能量的累计达到最大值，活化土体钾元素及土体钾元素达到平衡，因此在 12 天后，土体速效钾含量趋于不变。

红外光照处理与可见光处理对于土壤的活化随时间变化图像相似，可能由于白光对于土壤的钾元素活化作用，主要依靠其红外光照射，首周的土体速效钾含量为 4.34 mg/kg，速效钾含量提升 6.3%，与首周可见光照射相同，峰值出现在第 5 周、第 11 周，分别为 4.74 mg/kg、5.21 mg/kg，相较于未经红外光照射的土壤分别提升 16.2%、27.7%，第 11 周的峰值与可见光照射 12 周相似。

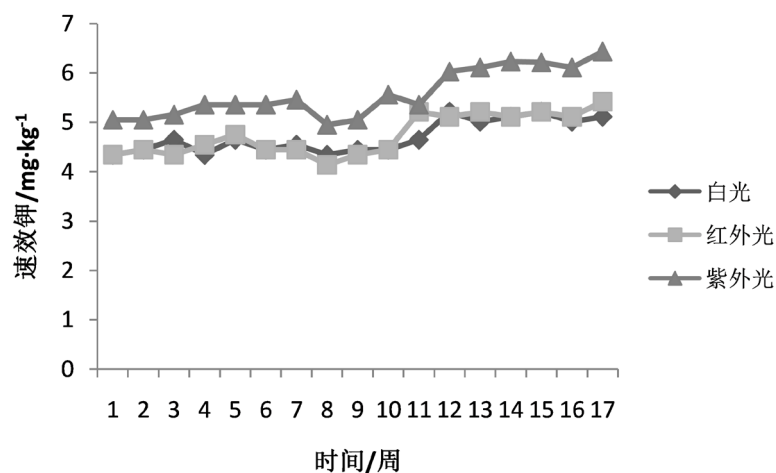


Figure 3. The effect of visible, ultraviolet and infrared light on soil available potassium  
图 3. 可见、紫外、红外光对土体速效钾的影响

紫外光照 17 周内土壤速效钾含量呈现逐步上升的趋势，土壤速效钾的变化，如图 3 所示，紫外光光照首周土壤速效钾含量为 5.05 mg/kg，比初始情况下土壤速效钾含量提升 23.7%，首周提升效果高于红外光、可见光照射情况下的首个峰值，在首周提升后，从第二周开始缓慢提升，第 3 周 5.15 mg/kg，第 4 周 5.35 mg/kg，一直到第 7 周也开始出现“勺”状曲线，钾存在的形态和作物吸收利用的情况，可分为



水溶性钾、交换性钾和粘土矿物中固定的钾三类，前两类可被当季作物吸收利用，统称为“速效性钾”，后一类是土壤钾的主要贮藏形态，不能被作物直接吸收利用，各种形态的钾彼此能相互转化，经常保持着动态平衡，在光照能量不足的情况下，出现速效钾部分转化为缓效钾的情况，在光照能量充足后，缓效钾向速效钾转换[21]，在12周结束“勺”型曲线后，速效钾含量持续增大，且增大程度较红外光照射更好，在第17周时达到最高6.43 mg/kg，相对初始值增加57.6%。由此可知，光照对于土壤速效钾的提高，有显著作用，特别是紫外光照射，有助于土壤中速效钾的释放。可能是紫外光对于土壤中的缓释钾结构具有较大的破坏作用，相较于以热的形式扩散的红外线和包含各种波段光源的白光，紫外光的频率更高，波长更短，更易使土壤中的缓释结构破坏，从而进一步的促进土壤中速效钾的释放。

### 3.3. 可见、紫外、红外光照对有效磷的活化作用

有效磷，是指土壤中可被植物吸收利用的磷的总称，包括全部水溶性磷、部分吸附态磷、一部分微溶性的无机磷和易矿化的有机磷等。母质中的磷被光照活化，产生无机磷，无机磷在未被利用的情况下，又转换为不能被植物直接利用的缓效磷，形成“母质-有效磷-缓效磷”的循环[22]。未进行光照处理的土样有效磷含量为3.94 mg/kg，可见光对于土壤有效磷的提升效果如图4所示，可见光照射首周，土壤有效磷含量为6.03 mg/kg，相较于未经光照土壤提高了53%，并在第6周出现一个小峰，有效磷含量为6.8 mg/kg，第9周、第14周出现较大波动，有效磷含量分别为11.67 mg/kg、11.35 mg/kg，土壤有效磷含量分别提升了196%、188%，第9周出现的峰值为最大值。可见光初期的波动较小，基本稳定，光照能量逐步累积，分别在第9周和第14周得到释放，因此第9周与第14周出现较大的波动峰值。红外光对于土壤有效磷的照射与可见光相似，均在首周照射后有较大提升，并在17周内出现多处峰值。红外光照条件下，首周有效磷含量提升至6.59 mg/kg，相较于未经光照土壤提高了67%，而在第7周、第11周、第14周出现三个峰值，照射时间越长，峰值越大，分别为9.38 mg/kg、10.68 mg/kg及11.30 mg/kg，相对初始含量提高了138%、171%、187%，第14周达到最大值，相较于白光，红外光与紫外光的波段更为纯粹，因此累积效应更为明显，磷元素的逐步活化取代了白光照射过程中有效磷的突然爆发增长。

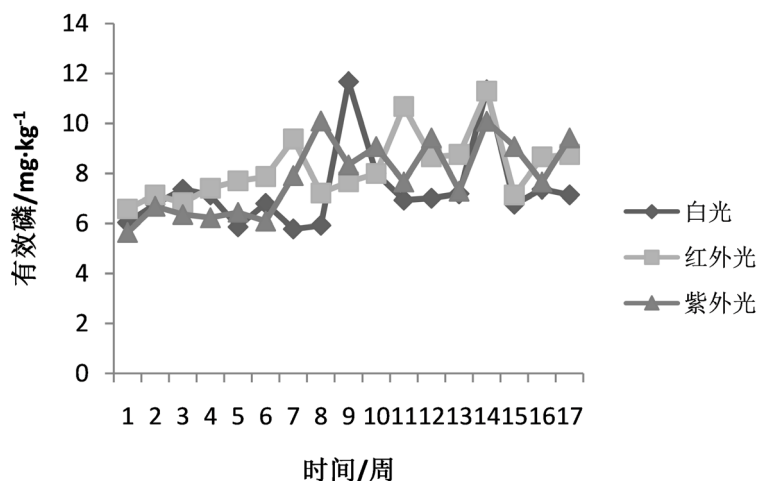


Figure 4. Shows the effect of ultraviolet and infrared light on soil available phosphorus  
图4. 可见、紫外、红外光对土体有效磷的影响

紫外光对于土体有效磷的活化作用如图4所示，紫外光光照首周土壤有效磷含量为5.64 mg/kg，比初始情况下土壤有效磷含量提升43.1%，首周提升效果低于红外光、可见光照射情况下首周含量，并在第6周开始含量突然提高，在第8周达到首个峰值，随后以增大-减少-增大的趋势持续波动，并在第

8周、第14周均达到较大值,含量为10.1 mg/kg, 相较初始值增加156%。于航等研究认为,光照促进土壤微生物把土壤中的有机态磷转化为无机态磷,从而促进内源磷的释放。

### 3.4. 可见、紫外、红外光照对活性有机碳的活化作用

土壤有机碳含量随光照时长的增加而降低。此结果与河流、海口沉积物在光照下的反应结果相近[23],光照可以促进植物残体质量的损失[24]和土壤腐殖酸的降解[25],因而光照使土壤有机碳含量降低是在预料之中。

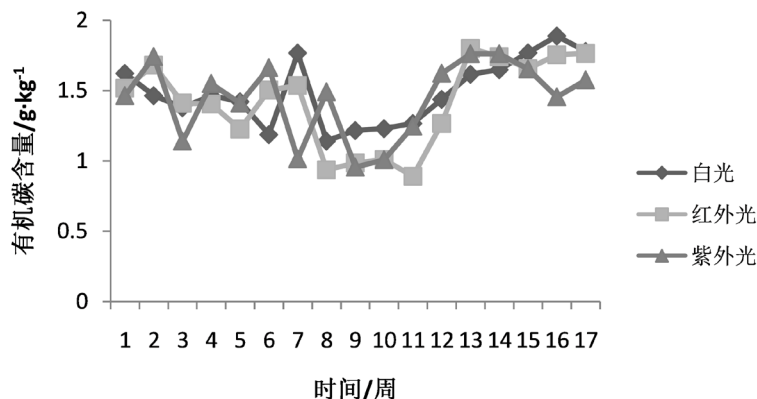


Figure 5. Shows the effect of ultraviolet and infrared light on soil available phosphorus  
图5. 可见、紫外、红外光对土体有机碳的影响

如图5,在光照过程中,可见光、红外光和紫外光照对于土壤活性有机碳的活化效果较好,首周可见光照射情况下,土壤活性有机碳含量降低至1.62 g/kg,随后持续降低,在光照的作用下,特别是红外光以热量的形式照射后,光照促进土壤中的有机碳分解为二氧化碳,在第6周达到1.188 g/kg,降低63%,随后逐渐增加,可能是土壤中腐殖质等降解,为土壤提供活性有机碳,从而补充了因光照产生的活性有机碳消耗,可见光照8周后,活性有机碳开始补充,至16周时含量为1.89 g/kg,相对第6周提升59%。

## 4. 结论

不同波长、不同光照时间对土体全氮、速效钾、有效磷及活性有机碳的含量存在影响:

1) 光照对于土壤全氮含量的影响,主要出现在首周,光照首周对于土壤全氮含量的提升较高,全氮含量首周均提升50%;

2) 红外、紫外、可见光三种光照对土体速效钾含量均有增加的作用,特别是紫外光对于土壤速效钾的活化作用明显,相较于可见光与红外光在首周活化速效钾6.3%,紫外光照射首周提升23.7%,经17周照射后,含量提升57.6%;

3) 红外、紫外、可见光光照对土体有效磷含量均有增加的作用,随光照时间的推移呈增加趋势,且在不同波长光照情况下,土壤有效磷含量较未活化土壤提升效果均在100%之上,最大提升量接近200%。

红外、紫外、可见光光照对土体活性有机碳含量均有降低的作用,可能由于光照过程中产生有机碳降解的现象,但在总体降低的情况下,可能同样存在对于活性有机碳含量的补充,紫外光与可见光照射下,均存在波动下降,在第8周含量增加的情况。

## 基金项目

陕西省土地工程建设集团有限责任公司内部科研项目“光照活化土体元素研究”(DJNY2018-15)。

## 参考文献

- [1] 王先进. 我国耕地的现状, 发展趋势及对策[J]. 科技导报, 1989, 7(4): 42-45.
- [2] 周健民. 浅谈我国土壤质量变化与耕地资源可持续利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 459-467.
- [3] 刘玉. 河北省耕地综合生产能力分析及应用研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
- [4] 徐莹. 硫素胁迫对烟草生长和生理过程的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [5] Gallo, M., Amonette, R., Lauber, C., *et al.* (2004) Microbial Community Structure and Oxidative Enzyme Activity in Nitrogen-Amended North Temperate Forest Soils. *Microbial Ecology*, **48**, 218-229. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-9001-x>
- [6] 孟赐福. 磷灰石组成与其在酸性土壤中溶解度之间的关系[J]. 土壤通报, 1989(2): 72-73.
- [7] 杨振明, 鲍士旦. 我国主要土壤不同粒级的矿物组成及供钾特点[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 163-167.
- [8] 陈文明, 钱汉东, 盛继福. 钾长石三个同质多象变体(透长石、正长石、微斜长石)之间相转变及其地质意义[J]. 矿物学报, 2010(s1): 18-19.
- [9] 李彦生, 王光华, 金剑. 大气 CO<sub>2</sub> 升高与农田土壤碳循环研究[J]. 土壤与作物, 2015(1): 19-26.
- [10] 张雷. 有机物料、温度和土壤水分对黑土有机碳分解的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2004.
- [11] 聂三安, 葛体达, 肖和艾, 等. 光照与黑暗培养对亚热带区稻田及旱地土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 93-97.
- [12] 曾希柏, 侯光炯, 青长乐, 等. 土壤-植物系统中光照与氮素的相互关系研究[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 103-108.
- [13] Zafiriou, O.C. and True, M.B. (1979) Nitrate Photolysis in Seawater by Sunlight. *Marine Chemistry*, **8**, 9-32. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(79\)90029-X](https://doi.org/10.1016/0304-4203(79)90029-X)
- [14] Schiebel, H.N., Wang, X., Chen, R.F., *et al.* (2015) Photochemical Release of Dissolved Organic Matter from Resuspended Salt Marsh Sediments. *Estuaries & Coasts*, **38**, 1692-1705. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9893-3>
- [15] Hoorens, B. and Aerts, R.M. (2010) Elevated UV-B Radiation Has No Effect on Litter Quality and Decomposition of Two Dune Grassland Species: Evidence from a Long-Term Field Experiment. *Global Change Biology*, **10**, 200-208. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00735.x>
- [16] 梁成华, 金耀青, 宋菲, 等. 黑云母的释钾能力及其生物有效性研究[J]. 土壤学报, 1994, 31(2): 220-223.
- [17] 于航, 张蕾, 王刚, 等. 光照强度和温度对三峡水库消落区典型土壤磷释放的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11539-11541.
- [18] 高凯, 朱铁霞, 任杰, 等. 不同地表条件对盐碱地土壤 N、P、K 含量的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2008, 23(5): 552-554.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 薛菁芳, 陈书强, 汪景宽. 玉米秸秆对棕壤中可溶性无机氮和有机氮的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2011(4): 41-45.
- [21] 李小坤, 鲁剑巍, 周六凤, 等. 不同种植条件下红壤性水稻土根区与非根区土壤钾素变化特征[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1371-1375.
- [22] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 I. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 145.
- [23] 赵彬, 姚鹏, 潘慧慧, 等. 长江口表层沉积物中有机碳的来源、分布与成岩状态[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(11): 49-62.
- [24] Schneider, S.H., Turner, B.L. and Garriga, H.M. (1998) Imaginable Surprise in Global Change Science. *Journal of Risk Research*, **1**, 165-185. <https://doi.org/10.1080/136698798377240>
- [25] Goni, M.A., Monacci, N., Gisewhite, R., *et al.* (2006) Distribution and Sources of Particulate Organic Matter in the Water Column and Sediments of the Fly River Delta, Gulf of Papua (Papua New Guinea). *Estuarine Coastal & Shelf Science*, **69**, 225-245. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.04.012>