

覆盖模式对冬作马铃薯铜素积累与分配特征的影响

刘涛¹, 官利兰², 邓伟^{3,4}, 管大伟¹, 谭微¹, 张新明^{1*}

1. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642; 2. 广东省恩平市农业技术推广服务中心, 广东恩平 529400; 3. 华南农业大学园艺学院, 广东广州 510642; 4. 乐安县农业技术推广中心, 江西乐安 344323

摘要: 马铃薯是世界第四大粮食作物, 但是关于稻壳覆盖和铜 (Cu) 素在该作物的研究较少。通过以马铃薯“费乌瑞它”为材料, 设置裸地 (CK)、稻壳 (6000 kg/hm²) 覆盖 (DK)、黑膜覆盖 (HM) 3 种覆盖模式处理进行田间全生育期冬作栽培, 研究不同覆盖模式下马铃薯植株对 Cu 素的积累与分配特征。研究结果显示, 不同覆盖模式下, 茎和叶的 Cu 素积累量均呈先增加后减小趋势, 块茎和全株 Cu 素积累量则呈逐渐增大趋势。茎和叶 Cu 素积累量从齐苗后 10 d 时分别占全株的 13.45%~17.70%和 82.30%~86.55%, 到齐苗后 58 d 时的 2.99%~3.53%和 8.40%~10.56%。块茎积累量从齐苗后 22 d 时的 26.76%~29.60%增加到齐苗后 58 d 时的 85.91%~88.68%。DK 处理下的植株 Cu 素积累量在全生育期总体上高于 CK 和 HM 处理的数值。其中 DK 比 CK 处理在茎、叶、块茎、全株最高可分别高 38.01%、80.92%、40.24%、72.45%, 比 HM 处理分别高 92.21%、47.22%、48.12%、45.16%。马铃薯植株在齐苗后 10 d 时的 Cu 素积累量与后期的 Cu 素积累量呈正相关, 茎和叶中 Cu 素积累量在齐苗后 58 d 前同产量也呈正相关。因此, 供试条件下, 在 6000 kg/hm² 水平的稻壳覆盖下能够有效提高马铃薯植株对 Cu 素的积累量。

关键词: 稻壳; 冬作马铃薯; 铜; 积累; 覆盖

中图分类号: S532 文献标识码: A

Effect of Mulching Pattern on the Characteristics of Copper Accumulation and Distribution in Winter Potato

LIU Tao¹, GUAN Lilan², DENG Wei^{3,4}, GUAN Dawei¹, TAN Wei¹, ZHANG Xinming^{1*}

1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2. Guangdong Enping Agricultural Technology Extension Center, Enping, Guangdong 529400, China; 3. College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 4. Le'an County Extension Center of Agricultural Technology, Le'an, Jiangxi 344323, China

Abstract: Potato is the fourth largest food crop in the world, but little research has been done on this crop about rice husk mulching and copper (Cu). Rice husk is a by-product of rice processing and has great potential to reduce environmental pollution. Plastic film mulching gives us a non-negligible problem of environmental pollution, and even crop yields will be affected. Compared with black film, it has the advantages of wide source, lower cost and no need for recycling, which can basically be used locally. Previous studies have shown that the photosynthetic pigment content, photosynthetic rate, nutrient content, plant height, stem thickness, tuber number, above ground dry weight and yield of potato plants were enhanced by both Cu solution dip treatment and foliar spray of Cu. In this experiment, the accumulation and distribution of Cu in potato plants under different mulching patterns were investigated by using potato “Favorita” as the material and three mulching patterns: bare ground (CK), rice husk (6 000 kg/hm²) mulching (DK) and black film mulching (HM) for winter cultivation in the field. The results showed that the accumulation of Cu in stems and leaves showed a trend of increasing and then decreasing under different mulching patterns, while the accumulation in tubers and whole plants showed a trend of gradually increasing. The accumulation of Cu in stems and leaves ranged

收稿日期 2022-07-12; 修回日期 2022-08-28

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2018YFD0200801)。

作者简介 刘涛 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 养分资源管理。*通信作者 (Corresponding author): 张新明 (ZHANG Xinming), E-mail: 1992876243@qq.com。

from 13.45%~17.70% and 82.30%~86.55% of the whole plant 10 d after full seedling emergence to 2.99%~3.53% and 8.40%~10.56% 58 d after full seedling emergence, respectively. The accumulation of tubers increased from 26.76%~29.60% 22 d after full seedling emergence to 85.91%~88.68% 58 d after full seedling emergence. The Cu accumulation of plants under DK treatment was generally higher than that of LD and HM treatments in the whole growth period. The Cu accumulation of plants under DK treatment was 38.01%, 80.92%, 40.24%, 72.45% more than that of CK treatment in stem, leaf, tuber and whole plant respectively, and 92.21%, 47.22%, 48.12%, 45.16% higher than that of the HM treatment, respectively. The accumulation of Cu in potato plants 10 d after full seedling emergence was positively correlated with the accumulation of Cu at the later stage, and the accumulation of Cu in stems and leaves was also positively correlated with the yield until 58 d after full seedling emergence. The difference in accumulation by site is due to the fact that in the early growth period, when potato plant is still in the seedling stage, stems and leaves are the sites of Cu accumulation. As the plant grows, tubers are gradually formed. About 31 days after full seedling emergence, the growth of stems and leaves gradually slow down, while the tubers are in the growth phase. At this time, the accumulation center shifts to the tuber, from stems and leaves, which shows that the accumulation of stem and leaves gradually decreases, while the accumulation of tuber continues to increase. The reasons for the higher accumulation of DK than CK and HM may be as follows. First, rice husk, on the other hand, can not only act as a thermal insulation layer to isolate strong external heat, but also improve soil water storage efficiency, increase soil water content, and have significant effects in reducing soil temperature. Second, rice husk can increase soil organic carbon content after being degraded as exogenous organic matter, and the study found that the soil available Cu content was significantly and positively correlated with soil organic carbon content. The experiment showed that under the test conditions, the accumulation of Cu by potato plants could be effectively increased under rice husk mulching at 6000 kg/hm² level.

Keywords: rice husk; winter potato; copper; accumulation; mulching

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.07.015

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是仅次于小麦、玉米和大米的世界第四大粮食作物^[1]。近年来, 中国马铃薯已经居于世界马铃薯面积与总产的首位^[2]。马铃薯不仅可以提供能量, 而且还提供可消化的蛋白质、多种必需的维生素和微量元素^[3]。但是在冬季, 我国南方约有 7.0×10^6 hm² 的农田处于闲置状态^[4], 其中广东省属于南亚热带—北热带季风性气候, 水源丰富, 冬季无霜期长, 有适合马铃薯生长要求的温度。此外, 马铃薯具有耐贫瘠、干旱、盐碱的能力, 还能在寒冷的气候下生长, 且生长周期短^[5], 这些特点使它成为广东省适宜的冬季作物。据调查, 冬作马铃薯占该省马铃薯种植面积的 85%^[6]。

改进耕作措施是有效提高作物产量的关键因子之一, 其中覆盖栽培作为一种保护性耕作措施, 已经广泛应用于农业生产实践当中^[7]。覆盖栽培可以有效削弱土壤侵蚀和水土流失^[8], 降低硝酸盐的淋溶损失^[9], 以及抑制杂草的生长^[10], 从而起到增产的作用^[11-12]。覆盖材料类型可分为有机材料 (秸秆、稻草等) 和无机材料 (塑料薄膜)。然而, 塑料薄膜覆盖在给我们带来巨大经济效益的同时产生了不可忽视的环境污染问题^[13]。而有机材料覆盖在不造成环境污染问题的同时还能降低土壤渗透阻力^[14]和影响土壤温度^[15], 提高土壤

肥力^[16], 其可降解性还节省了回收所带来的劳动力成本。

稻壳是稻谷加工的副产品, 在减少环境污染方面具有很大的潜力。与黑膜相比具有来源广、成本低、无需回收等优点, 基本可以做到就地取材。稻壳主要成分为 α 纤维素 (25%~35%)、半纤维素 (18%~21%)、二氧化硅 (15%~17%) 和水分^[17], 其中二氧化硅含量约占灰分含量的 95%^[18]。全球每年生产稻壳约 1.37×10^8 t, 然而大部分稻壳未得到充分利用^[19]。铜 (Cu) 主要以 Cu⁺ 和 Cu²⁺ 形式存在于细胞中, 在植物细胞内细胞质基质、内质网、线粒体内膜、叶绿体基质、类囊体腔和质外体等结构离不开 Cu^[20]。在植物中, Cu 作为调节蛋白的结构元素, 参与光合电子传递、线粒体呼吸、氧化应激反应、细胞壁代谢和激素信号传导等过程^[21]。植物体中一半以上的 Cu 存在于叶绿体中, 并参与光合作用^[22]。当植物中的 Cu 处于低水平浓度时, 幼叶和生殖器官将受到影响; 相反, 过量的 Cu 则会产生极大的毒性, 引起诸如萎缩和坏死、发育不良、抑制根和芽的生长等症状^[23]。研究表明, 施加 Cu 对马铃薯块茎数和产量都有提升^[24]。马铃薯种薯经适宜浓度 Cu 溶液处理过后的产量增加了 10.32%~24.68%^[25], 光合色素的含量、光合速率以及叶比

重分别提升了 38.18%~49.62%、4.88%~14.98%、5.49%~10.76%^[26]。在马铃薯块茎形成期的叶片喷施 Cu 也可显著提高叶绿素含量、光合速率和产量^[27]。此外,无论是 Cu 溶液浸种处理还是叶面喷施 Cu,马铃薯植株的养分含量、株高、茎粗、地上部干重和产量也有提升^[28]。王海泉等^[29]通过喷施微肥发现对上述性状也有改善作用。

随着环境、能源和资源问题日趋严重,走可持续发展之路已经成为人们的共识。而广东省作为南方冬作区的马铃薯主产区之一,对稻壳覆盖技术在马铃薯上的应用研究很少。同时,前人关于马铃薯营养元素的研究基本侧重在氮、磷、钾三类大量元素,关于微量元素的研究内容较少。因此,有必要开展稻壳—马铃薯冬作马铃薯植株对铜素积累与分配特征研究,为稻壳覆盖部分或全部替代黑膜覆盖技术提供理论依据,对于广东省冬作马铃薯产业的持续发展将具有重要的实践意义。

1 材料与方 法

1.1 材 料

选用供试马铃薯品种费乌瑞它 (Favorita),为一级脱毒种薯,生物有机肥和缓释复合肥 (14-6-24) 为供试肥料,黑色农用地膜为供试地膜,稻谷加工所剩残壳为供试稻壳,且未经粉碎等其他处理。

试验于 2020—2021 年在广东省江门市恩平市恩城街道深水村进行,地理位置 22°14'6"N、112°19'50"E,属南亚热带季风气候。土壤为水稻土,前茬作物为水稻。土壤质地为轻壤土,pH 5.3,含有机质 17.11 g/kg、碱解氮 62.7 mg/kg、有效磷 79.0 mg/kg、速效钾 61.5 mg/kg、有效铜 96.36 μg/kg。

1.2 方 法

1.2.1 试验设计 试验设置裸地 (CK)、稻壳 (6000 kg/hm²) 覆盖 (DK)、黑膜覆盖 (HM) 3 种覆盖模式,其中裸地为对照组,其余操作一致。

本试验采用高垄双行“品”字形种植,随机区组排列,每个处理重复 3 次,每次重复含 3 垄,面积为 39 m²,田垄长宽为 10 m×1.3 m,其中中间垄为测产垄,其余两垄为采样垄。每垄种植 90 株。于 2020 年 11 月 14 日播种,采用“一基免追”施肥模式施用 4500 kg/hm² 生物有机肥和 1500 kg/hm² 缓释复合肥 (14-6-24)。参照《广东冬种马铃薯优质高产栽培实用技术》^[30]进行田间

管理。于 2021 年 3 月 18 日收获,并对每个重复进行测产。

1.2.2 项目测定 (1) 马铃薯植株的采集与处理。2020 年 12 月 18 日达到齐苗 (80% 的出苗率) 水平,于齐苗后 10、22、34、46、58 d 采样,共 5 次 (块茎在齐苗 10 d 后并未形成,故其采样次数为 4 次)。在每个小区采样垄随机选取生长形势较为一致的马铃薯 3 株进行采样。采集的植株样经洗涤、晾干后分为茎、叶、块茎并分别称取鲜重,然后将各鲜样分别装入牛皮纸袋,放置于 105 °C 烘箱中杀青 30 min,并在 75 °C 恒温下烘干 1~2 d 至恒重并称重;再将干样粉碎过筛后装入密封袋,放置于干燥器中保存以供分析测定。

(2) 样品分析。植株全 Cu 测定采用 AAS 法^[31]。

1.3 数 据 处 理

采用 Excel 16.60 和 SPSS 26.0.0.2 软件进行数据分析。

$$\text{Cu 素积累量} (\mu\text{g}/\text{株}) = \text{Cu 素浓度} (\text{mg}/\text{kg}) \times \text{单株干重} (\text{g})$$

$$\text{Cu 素分配率} = \frac{\text{某部位 Cu 素积累量} (\mu\text{g}/\text{株})}{\text{全株 Cu 素积累量} (\mu\text{g}/\text{株})} \times 100\%$$

$$\text{每吨鲜薯对 Cu 素的需求量} (\text{mg}/\text{t}) = \frac{\text{全株 Cu 素积累量} (\text{mg})}{\text{块茎产量} (\text{t})}$$

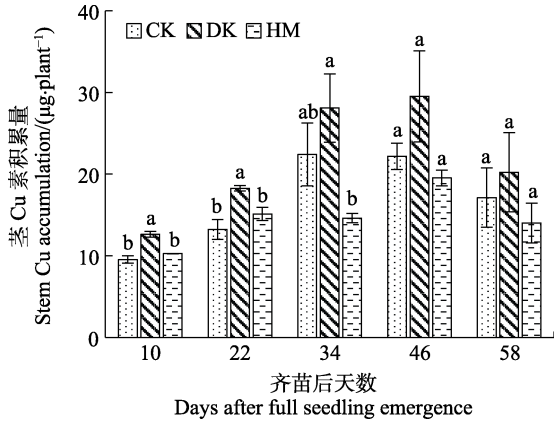
2 结 果 与 分 析

2.1 覆盖模式对马铃薯茎 Cu 素积累量的影响

由图 1 可知,3 种覆盖模式下的马铃薯茎 Cu 素积累量变化范围在 9.55~29.53 μg/株之间。各处理 Cu 素积累量均在齐苗后 46 d 左右出现峰值,此时 Cu 素积累量由小到大依次为 19.53、22.17、29.53 μg/株,随后下降,其中,CK 和 DK 处理 Cu 素积累量在达到峰值前逐渐增高,而 HM 处理在达到峰值前出现轻微下降趋势。在同一采样时期内,DK 处理下马铃薯茎 Cu 素积累量始终高于 CK 和 HM 处理,且在齐苗后 10 d 和 22 d 时达显著性差异 ($P < 0.05$)。DK 处理最高比 CK 处理高 38.01% (齐苗后 22 d),比 HM 处理高 92.21% (齐苗后 34 d)。HM 处理下 Cu 素积累量在齐苗后 10 d 和 22 d 高于 CK 处理,但在后期低于 CK 处理,且二者 Cu 素积累量差异始终不显著。

2.2 覆盖模式对马铃薯叶 Cu 素积累量的影响

由图 2 可知,3 种覆盖模式下的马铃薯叶 Cu 素积累量变化范围在 45.30~176.21 μg/株之间。各处理 Cu 素积累量随着生长发育进程均呈先增高

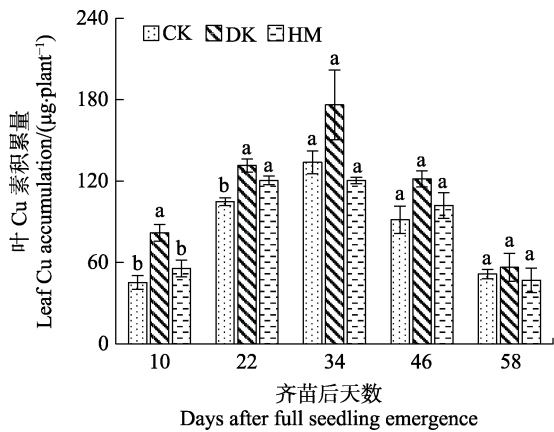


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同覆盖模式下马铃薯茎 Cu 素积累量

Fig. 1 Accumulation of Cu in potato stem under different mulching patterns



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同覆盖模式下马铃薯叶 Cu 素积累量

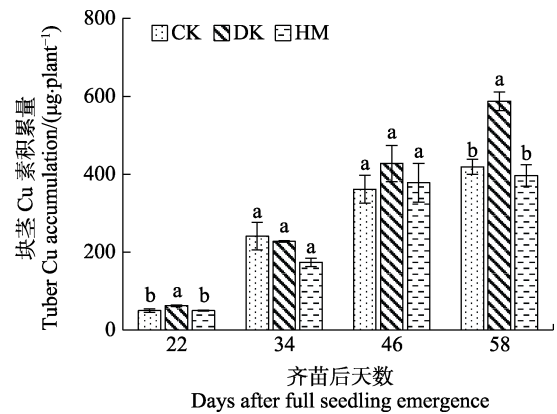
Fig. 2 Accumulation of Cu in potato leaf under different mulching patterns

后降低趋势,且在齐苗后 34 d 左右出现峰值,此时 Cu 素积累量从小到大依次为 120.59、133.85、176.21 $\mu\text{g}/\text{株}$ 。在同一采样时期内,DK 处理下马铃薯叶 Cu 素积累量始终高于 CK 和 HM 处理,且在齐苗后 10 d 时显著高于 CK 和 HM 处理,在齐苗后 22 d 时显著高于 CK 处理。DK 处理最高比 CK 处理高 80.92% (齐苗后 10 d),比 HM 处理高 47.22% (齐苗后 10 d)。HM 处理下 Cu 素积累量在齐苗后 10、22、46 d 时高于 CK 处理,且在 22 d 时达显著差异,在 34 d 和 58 d 时低于 CK 处理但未达显著差异。

2.3 覆盖模式对马铃薯块茎 Cu 素积累量的影响

由图 3 可知,3 种覆盖模式下的马铃薯块茎

Cu 素积累量变化范围在 49.90~587.18 $\mu\text{g}/\text{株}$ 。各处理 Cu 素积累量随着生长发育进程逐渐增高,在齐苗后 58 d 时 Cu 素积累量从小到大依次为 396.43、418.70、587.18 $\mu\text{g}/\text{株}$ 。在齐苗后 22 d、46 d 和 58 d 时,DK 处理下马铃薯块茎 Cu 素积累量高于 CK 和 HM 处理,且在 22 d 和 58 d 时达显著水平。DK 处理最高比 CK 处理高 40.24% (齐苗后 58 d),比 HM 处理高 48.12% (齐苗后 58 d)。HM 处理下 Cu 素积累量在齐苗后 22 d、46 d 和 58 d 时低于 CK 处理,在 46 d 时高于 CK 处理,但二者处理始终未呈现显著差异。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同覆盖模式下马铃薯块茎 Cu 素积累量

Fig. 3 Accumulation of Cu in potato tuber under different mulching patterns

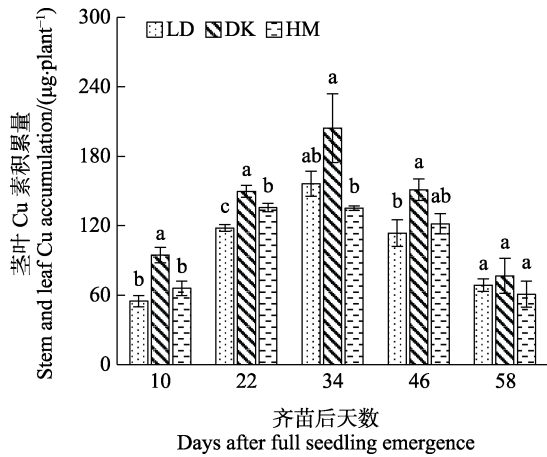
2.4 覆盖模式对马铃薯茎叶 Cu 素积累量的影响

由图 4 可知,3 种覆盖模式下的马铃薯茎叶 Cu 素积累量变化范围在 54.85~204.32 $\mu\text{g}/\text{株}$ 之间。

各处理 Cu 素积累量随着生长发育进程逐渐增高后降低,且在齐苗后约 34 d 达到峰值,此时 Cu 素积累量由小到大依次为 135.22、156.26、204.32 $\mu\text{g}/\text{株}$ 。在同一采样时期内,DK 处理下马铃薯茎叶 Cu 素积累量始终高于 CK 和 HM 处理,且在齐苗后 10 d 和 22 d 时达到显著差异。DK 处理最高比 CK 处理高 72.45% (齐苗后 10 d),比 HM 处理高 51.10% (齐苗后 34 d)。HM 处理下 Cu 素积累量在齐苗后 10、22、46 d 高于 CK 处理,在 34 d 和 58 d 低于 CK 处理,其中,在齐苗后 22 d 时二者差异显著。

2.5 覆盖模式对马铃薯全株 Cu 素积累量的影响

由图 5 可知,CK 和 DK 处理下的马铃薯全株

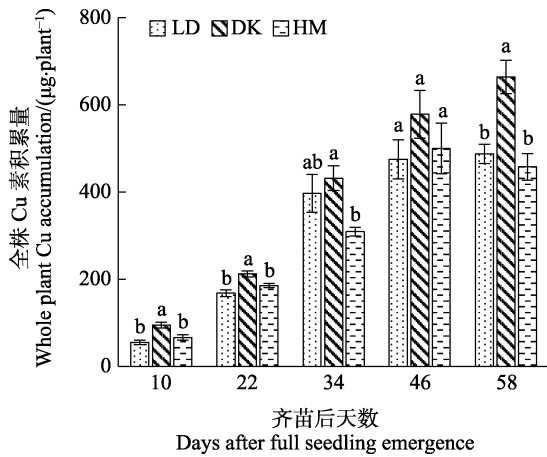


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 4 不同覆盖模式下马铃薯茎叶 Cu 素积累量

Fig. 4 Accumulation of Cu in potato stem and leaf under different mulching patterns



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 5 不同覆盖模式下马铃薯全株 Cu 素积累量

Fig. 5 Accumulation of Cu in whole plant of potato under different mulching patterns

Cu 素积累量变化范围在 54.85~663.94 µg/株。各处理随着生长发育进程 Cu 素积累量逐渐增高, HM 处理在齐苗后约 46 d 达到峰值后出现轻微降低, CK、DK 和 HM 处理 Cu 素积累量最大值分别为 487.37、663.94、499.59 µg/株。在同一采样时期内, DK 处理下马铃薯全株 Cu 素积累量始终高于 CK 和 HM 处理, 且在齐苗后 10、22、58 d 时显著高于其余处理。DK 处理最高比 CK 处理高 72.45% (齐苗后 10 d), 比 HM 处理高 45.16% (齐苗后 58 d)。HM 处理下 Cu 素积累量在齐苗后 10、22 d 和 46 d 时高于 CK 处理, 在 34 d 和 58 d 时低于 CK 处理, 但二者处理始终未呈现显著差异。

2.6 覆盖模式对马铃薯植株 Cu 素分配率的影响

由图 6 可知, 马铃薯块茎 Cu 素分配率随生长发育进程逐渐升高, 茎和叶 Cu 素分配率逐渐降低。齐苗后 10 d 时马铃薯茎和叶 Cu 素积累量分别占 13.45%~17.70%和 82.30%~86.55%。随着生长发育进程推进, Cu 素的积累中心由茎和叶转向块茎, 在齐苗后 58 d 时, 茎和叶 Cu 素积累量占比仅为 2.99%~3.53%和 8.40%~10.56%。而块茎对 Cu 素积累量占比从齐苗后 22 d 时的 26.76%~29.60%增加到齐苗后 58 d 时的 85.91%~88.68%, 此时块茎 Cu 素积累量占比从大到小依次为 DK、HM 和 CK。

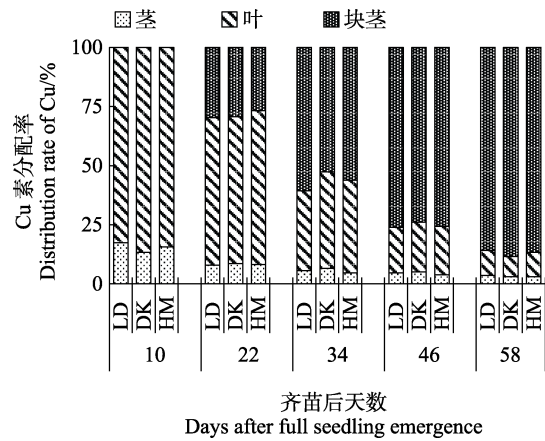


图 6 不同覆盖模式下马铃薯 Cu 素分配率

Fig. 6 Distribution of Cu in potato under different mulching patterns

建立茎叶和块茎 2 个部位对 Cu 素积累量的拟合方程 (表 1), 通过计算两方程交点横坐标得知: CK、DK、HM 三种处理下茎叶和块茎 Cu 素积累量占比分别在齐苗后 30、32、31 d 时达到平衡。

表 1 不同覆盖模式下马铃薯 Cu 素积累量拟合方程

Tab. 1 Fitting equations for Cu accumulation in potato under different mulching patterns

处理 Treatment	部位 Part	拟合方程 Fitting equation	R ²
CK	茎叶	$y = -0.0268x^2 + 3.6429x - 34.79$	0.9974
	块茎	$y = 0.0268x^2 - 3.6429x + 134.79$	0.9974
DK	茎叶	$y = -0.0159x^2 + 2.9286x - 27.631$	0.9999
	块茎	$y = 0.0159x^2 - 2.9286x + 127.63$	0.9999
HM	茎叶	$y = -0.0204x^2 + 3.2335x - 31.565$	0.9972
	块茎	$y = 0.0204x^2 - 3.2335x + 131.56$	0.9972

2.7 产量 1 000 kg 对 Cu 素的吸收积累量

由表 2 可知,不同覆盖模式 Cu 素 1000 kg 产量马铃薯全株吸收积累量以 DK 处理最高,为 1327.20 mg,CK 处理次之,为 1270.35 mg, HM 处理最小,为 997.47 mg。三者间差异不显著,平均吸收积累 1198.34 mg。

表 2 不同覆盖模式下产量 1000 kg 对 Cu 素的积累量
Tab. 2 Accumulation of Cu for the 1000 kg yield under different mulching patterns

处理 Treatment	积累量 Accumulation/mg
CK	1270.35±86.59 ^a
DK	1327.20±103.50 ^a
HM	997.47±88.73 ^a
平均值	1198.34

注:相同小写字母表示差异未达显著水平 ($P>0.05$)。

Note: Same lowercase letters indicate no significant difference ($P>0.05$).

2.8 Cu 素积累量和产量相关分析

由表 3 可知,马铃薯植株茎和叶的 Cu 素积累量与产量在齐苗后 10、22、34、46 d 时呈正相关,其中茎的 Cu 素积累量与产量在齐苗后 22 d 时达到显著水平,叶始终未达到显著水平。

表 3 不同时期和部位 Cu 素积累量和产量的相关分析
Tab. 3 Correlation analysis of Cu accumulation and yield at different periods and parts

齐苗后天数 Days after full seedling emergence	线性相关系数 Linear correlation coefficient (r)	
	茎 Stem	叶 Leaf
10	0.618	0.658
22	0.708 [*]	0.601
34	0.136	0.294
46	0.461	0.541
58	-0.214	-0.186

注: *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

由表 4 可知,马铃薯植株茎和叶在齐苗后 10 d 的 Cu 素积累量与各部位后期所有 Cu 素积累量呈正相关,其中,茎与齐苗后 22 d 时的积累量呈极显著正相关,叶与齐苗后 22 d 和 46 d 时的积累量呈显著正相关。

3 讨论

本研究表明,不同覆盖模式下马铃薯在全生育期对 Cu 素的吸收积累趋势基本一致。由于块茎积累量占比较大,故马铃薯植株全株 Cu 素积

表 4 齐苗 10 d 后不同部位 Cu 素积累量与各部位后期 Cu 素积累量相关分析

Tab. 4 Correlation analysis between Cu accumulation in different parts 10 d after full seedling emergence and Cu accumulation at later periods of each part

部位 Part	齐苗后天数 Days after full seedling emergence			
	22	34	46	58
茎	0.798 ^{**}	0.514	0.666	0.324
叶	0.689 [*]	0.327	0.746 [*]	0.486

注: *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

累量基本呈现出逐渐增加的状态。该吸收积累趋势与 SORATTO 等^[32]对马铃薯和与宋春风等^[33]对芋的研究结果基本一致。

各部位积累量出现差异是由于在生育期前期,马铃薯植株还处于苗期,茎和叶是 Cu 素的积累场所。随着生育时期进程的推进,块茎逐渐形成。在齐苗后 22 d 左右时,马铃薯植株各部位均有 Cu 素的积累,此时的植株茎、叶和块茎均处于生长旺盛阶段。由达到平衡期时间可知,在齐苗后约 31 d 时茎叶的生长逐渐缓慢,而块茎处于增长期。此时积累中心向块茎转移,表现为茎叶的积累量逐渐下降,块茎积累量继续增加。

但不同覆盖模式下马铃薯在全生育期对 Cu 素的吸收存在差异,表现为 DK>CK、HM,该差异在齐苗后 34 d 之前基本达到显著水平,而 CK 和 HM 处理下的积累量差异无明显规律。其原因可能如下:

一是马铃薯的生长会受到炎热天气的影响^[34]。相较于黑膜覆盖可显著提高土壤温度^[35],稻壳则不仅可以作为隔热层隔绝外部强大的热量,而且能提高土壤储水效率,增加土壤含水量^[36-37],在保持土壤温度方面有显著效果^[38]。KAR 等^[39]发现秸秆覆盖下的土壤表层最高温度降低了 6~8 °C,从而使马铃薯根系处于更适合生长的小气候中,促进了对 Cu 的累积。二是稻壳作为外源有机物被降解后可增加土壤有机碳含量^[40],而研究发现土壤有效 Cu 含量与土壤有机碳含量呈显著正相关^[41],这对于马铃薯对 Cu 素的累积也有促进作用。

不同覆盖模式 Cu 素 1000 kg 产量马铃薯全株吸收积累量为 997.47~1327.20 mg,以 DK 处理最高,为 1327.20 mg,CK 处理次之, HM 处理最小。该积累量与白艳姝^[42]研究下的紫花白相比较,约

为其 1/3, 可能是种植区域和品种间的差异造成。

通过相关分析发现, 马铃薯植株在齐苗后 10 d 时的积累量与后期的 Cu 素积累量呈正相关, 茎和叶中 Cu 素积累量在齐苗后 58 d 之前同产量也呈正相关, 表明在马铃薯生长前期 Cu 素的积累量对后期 Cu 素的累积和产量具有重要影响。

参考文献

- [1] ZHANG H, XU F, WU Y, HU H, DAI X. Progress of potato staple food research and industry development in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(12): 2924-2932.
- [2] 徐亚新, 何萍, 仇少君, 徐新朋, 马进川, 丁文成, 赵士诚, 高强, 周卫. 我国马铃薯产量和化肥利用率区域特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 22-35.
- XU Y X, HE P, QIU S J, XU X P, MA J C, DING W C, ZHAO S C, GAO Q, ZHOU W. Regional variation of yield and fertilizer use efficiency of potato in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 22-35. (in Chinese)
- [3] ANDRIVON D. Potato facing global challenges: how, how much, how well?[J]. *Potato Research*, 2017, 60(3/4): 389-400.
- [4] 江立凯, 马旭, 武涛, 陈学深, 孙国栋, 谭永炘, 鹿芳媛, 陈桂生. 南方冬种马铃薯收获机的应用现状与研究展望[J]. *农机化研究*, 2016, 38(7): 263-268.
- JIANG L K, MA X, WU T, CHEN X S, SUN G D, TAN Y X, LU F Y, CHEN G S. Application status and research prospect of southern winter planting potato harvesting machine[J]. *Agricultural mechanization research*, 2016, 38(7): 263-268. (in Chinese)
- [5] MU T, SUN H, LIU X. Potato staple food processing technology[M]. Singapore: Springer Singapore, 2017: 1-6.
- [6] LU Y, KEAR P, LU X, GATTO M. The status and challenges of sustainable intensification of rice-potato systems in southern China[J]. *American Journal of Potato Research*, 2021, 98(5/6): 361-373.
- [7] OPARA-NADI O A, LAL R. Influence of method of mulch application on growth and yield of tropical root crops in southeastern Nigeria[J]. *Soil and Tillage Research*, 1987, 9(3): 217-230.
- [8] BUSARI M A, KUKAL S S, KAUR A, BHATT R, DULAZI A A. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(2): 119-129.
- [9] HARAGUCHI T, MARUI A, YUGE K, NAKANO Y, MORI K. Effect of plastic-film mulching on leaching of nitrate nitrogen in an upland field converted from paddy[J]. *Paddy and Water Environment*, 2004, 2(2): 67-72.
- [10] ABOUZIENA H F, HAFEZ O M, EL-METWALLY I M, SHARMA S D, SINGH M. Comparison of weed suppression and mandarin fruit yield and quality obtained with organic mulches, synthetic mulches, cultivation, and glyphosate[J]. *HortScience*, 2008, 43(3): 795-799.
- [11] RAMAKRISHNA A, TAM H M, WANI S P, LONG T D. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2-3): 115-125.
- [12] YANG Y, DING J, ZHANG Y, WU J, ZHANG J, PAN X, GAO C, WANG Y, HE F. Effects of tillage and mulching measures on soil moisture and temperature, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201(31): 299-308.
- [13] GOLDBERGER J R. 2018 afhvs presidential address: agriculture in the plastic age[J]. *Agriculture and Human Values*, 2018, 35(4): 899-904.
- [14] EDWARDS L, BURNEY J R, RICHTER G, MACRAE A H. Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 81(3): 217-222.
- [15] 黄金辉, 廖允成, 高茂盛, 殷瑞敬. 耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2652-2658.
- HUANG J H, LIAO Y C, GAO M S, YIN R J. Effects of tillage and mulching on orchard soil moisture content and temperature in Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2652-2658. (in Chinese)
- [16] AKHTAR K, WANG W, KHAN A, REN G, ZAHEER S, SIAL T A, FENG Y, YANG G. Straw mulching with fertilizer nitrogen: an approach for improving crop yield, soil nutrients and enzyme activities[J]. *Soil Use and Management*, 2019, 35(3): 526-535.
- [17] CHEN Z, XU Y, SHIVKUMAR S. Microstructure and tensile properties of various varieties of rice husk: microstructure and tensile properties of various varieties of rice husk[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(3): 1061-1070.
- [18] GENIEVA S D, TURMANOVA S C, DIMITROVA A S, VLAEV L T. Characterization of rice husks and the products of its thermal degradation in air or nitrogen atmosphere[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2008, 93(2): 387-396.
- [19] LIM J S, ABDUL MANAN Z, WAN ALWI S R, HASHIM H. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3084-3094.
- [20] PILON M, ABDEL-GHANY S E, COHU C M, GOGOLIN K A, YE H. Copper cofactor delivery in plant cells[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, 9(3): 256-263.
- [21] YRUELA I. Copper in plants[J]. *Brazilian Journal of Plant*

- Physiology, 2005, 17(1): 145-156.
- [22] HÄNSCH R, MENDEL R R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl)[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, 12(3): 259-266.
- [23] YRUELA I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions[J]. *Functional Plant Biology*, 2009, 36(5): 409.
- [24] AL-JOBORI K M M, AL-HADITHY S A. Response of potato (*Solanum tuberosum*) to foliar application of iron, manganese, copper and zinc[J]. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2014, 7(7): 358-363.
- [25] 白宝璋, 田文勋, 赵景阳, 白嵩, 姜润田, 刘佩兰, 李威, 刘武仁. 铜对马铃薯生物效应的研究[J]. *吉林农业科学*, 1994(1): 54-57.
BAI B Z, TIAN W X, ZHAO J Y, BAI S, JIANG R T, LIU P L, LI W, LIU W R. Biological effect of copper on potato[J]. *Jilin Agricultural Science*, 1994(1): 54-57. (in Chinese)
- [26] 白嵩, 吕芳芝, 白宝璋, 李秀坤, 刘志清, 陈文荣. 铜对马铃薯块茎产量与生理生化特性的影响[J]. *植物学通报*, 1996, 13(1): 58-59.
BAI S, LYU F Z, BAI B Z, LI X K, LIU Z Q, CHEN W R. Effect of copper on tuber yield and physiological and biochemical characteristics of potato[J]. *Botanical Bulletin*, 1996, 13(1): 58-59. (in Chinese)
- [27] 郭洪芸, 傅连海, 刘刚. 叶面喷施 B、Cu 对马铃薯的影响[J]. *马铃薯杂志*, 1999, 13(3): 131-133.
GUO H Y, FU L H, LIU G. The influence of B and Cu on potato by foliage spray[J]. *Potato Journal*, 1999, 13(3): 131-133. (in Chinese)
- [28] 孟赐福, 傅庆林. 微量元素对马铃薯产量和品质的影响[J]. *马铃薯杂志*, 1992, 6(2): 99-101.
MENG C F, FU Q L. Effect of trace elements on yield and quality of potato[J]. *Potato Journal*, 1992, 6(2): 99-101. (in Chinese)
- [29] 王海泉, 朱继强, 汪建学, 赵献淘. 微量元素与植物生长调节剂配合对马铃薯生理指标及产量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2005(5): 19-21.
WANG H Q, ZHU J Q, WANG J X, ZHAO X T. The effect of microelement and plant growing regulator on the physiological characteristics and yield of potato[J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2005(5): 19-21. (in Chinese)
- [30] 曹先维. 广东冬种马铃薯优质高产栽培实用技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2012: 31-53.
CAO X W. Practical techniques for high quality and high yield cultivation of winter potatoes in Guangdong[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2012: 31-53. (in Chinese)
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版, 北京: 中国农业出版社, 2000: 279-281.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. third edition, Beijing: China Agricultural Press, 2000: 279-281. (in Chinese)
- [32] SORATTO R P, FERNANDES A M, DE SOUZA-SCHLICK G D. Nutrient extraction and exportation by potato cultivars: II - micronutrients[J]. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 2011, 35(6): 2057-2071.
- [33] 宋春风, 徐坤. 芋对铁锰铜锌吸收分配规律的研究[J]. *西北农业学报*, 2004, 13(3): 114-117.
SONG C F, XU K. Absorption and distribution of micro-element in taro[J]. *Northwest Journal of Agriculture*, 2004, 13(3): 114-117. (in Chinese)
- [34] HANDAYANI T, WATANABE K. The combination of drought and heat stress has a greater effect on potato plants than single stresses[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2020, 66(4): 175-182.
- [35] IBARRA-JIMENEZ L, ZERMENO-GONZALEZ A, LOZANO-DEL RIO J, CEDENO-RUBALCAVA B, ORTEGA-ORTIZ H. Changes in soil temperature, yield and photosynthetic response of potato (*Solanum tuberosum* L.) under coloured plastic mulch[J]. *Agrochimica*, 2008, 52(4): 263-272.
- [36] JOHNSON J M, HOUGH-GOLDSTEIN J A, VANGESSEL M J. Effects of straw mulch on pest insects, predators, and weeds in watermelons and potatoes[J]. *Environmental Entomology*, 2004, 33(6): 1632-1643.
- [37] ZHANG S, LI P, YANG X, WANG Z, CHEN X. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112(1): 92-97.
- [38] CAO J, ZHOU X, ZHANG W, LIU C, LIU Z. Effects of mulching on soil temperature and moisture in the rain-fed farmland of summer corn in the Taihang Mountain of China[J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2012, 10(1): 519-523.
- [39] KAR G, KUMAR A. Effects of irrigation and straw mulch on water use and tuber yield of potato in eastern India[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 94(1/3): 109-116.
- [40] HU Y, SUN B, WU S, FENG H, GAO M, MA P, ZHANG T, PI X. Soil carbon and nitrogen of wheat-maize rotation system under continuous straw and plastic mulch[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2021, 119(2): 181-193.
- [41] CHAIGNON V, SANCHEZ-NEIRA I, HERRMANN P, JAILLARD B, HINSINGER P. Copper bioavailability and extractability as related to chemical properties of contaminated soils from a vine-growing area[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 123(2): 229-238.
- [42] 白艳姝. 马铃薯养分吸收分配规律及施肥对营养品质的影响[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2007.
BAI Y S. Nutrient Absorption, Distribution and effects of fertilization on nutrient, quality of potato[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007. (in Chinese)