

张新明, 程根, 徐鹏举, 等. 稻草覆盖对马铃薯土壤养分释放及养分平衡的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(6): 59-66.
ZHANG Xinming, CHENG Gen, XU Pengju, et al. Effects of straw mulching on nutrient release and nutrient balance in potato soil [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(6): 59-66.

稻草覆盖对马铃薯土壤养分释放及养分平衡的影响

张新明^{1†}, 程根^{1,2†}, 徐鹏举³, 曹先维⁴

(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;
3 惠东县农业技术推广中心, 广东 惠州 516300; 4 华南农业大学 园艺学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探索马铃薯种植过程中稻草覆盖还田模式下稻草 N、P、K 释放和土壤 N、P、K 养分平衡的特征。【方法】采用盆栽试验的方法, 对稻草覆盖还田后的腐解速率及养分释放状况进行研究。【结果】稻草覆盖还田 82 d 后, 其 C、P 含量变化较小, K 含量降低 93.96%, 而 N 含量却提高了 49.22%; 覆盖稻草可为土壤提供大量养分且以 K 居多, 每覆盖还田 100 kg 稻草可为马铃薯生长提供 N 0.42 kg、P 0.14 kg(P₂O₅) 和 K 1.70 kg(K₂O); 稻草腐解率为 70.87%; 各养分累积释放率表现为: K>C>P>N, C、N 和 P 累积释放率分别为 71.89%、56.85% 和 68.75%, K 累积释放率最高, 为 98.22%。覆盖稻草和施用钾肥对土壤 K 平衡影响较大, 不施钾肥和稻草土壤的 K 亏缺达 163.80 kg/hm², 覆盖稻草或施用钾肥均可有效降低土壤钾素亏缺量, 稻草与钾肥配合施用可使土壤 K 收支平衡, 甚至盈余。【结论】在稻草覆盖还田情况下, 可适当减少钾肥用量, 以降低生产成本, 缓解我国钾肥资源匮乏的困境。

关键词: 马铃薯; 养分释放; 养分平衡; 稻草覆盖还田; 腐解

中图分类号: S151.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)06-0059-08

Effects of straw mulching on nutrient release and nutrient balance in potato soil

ZHANG Xinming^{1†}, CHENG Gen^{1,2†}, XU Pengju³, CAO Xianwei⁴

(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3 Huidong Agricultural Technical Extension Center, Huizhou 516300, China;
4 College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 To study the characteristics of nitrogen(N), phosphorus(P) and potassium (K) nutrient release and soil N, P, K nutrient balance under straw mulching pattern during potato planting process.

【Method】 We studied the decomposition rate and nutrient release status of mulching straw using pot experiment. 【Result】 Straw carbon (C) and P contents changed slightly after mulching for 82 days, while K content decreased by 93.96%, and N content increased by 49.22%. The mulching straw provided a large amount of nutrients (especially K) with 100 kg mulching straw contributing 0.42 kg N, 0.14 kg P (P₂O₅), and 1.70 kg K (K₂O) to soil used for potato growth. Straw decomposition rate was 70.87%. The nutrient accumulative release

收稿日期: 2018-11-06 网络首发时间: 2019-10-28 09:20:38

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20191025.0844.022.html>

作者简介: 张新明 (1965—), 男, 副教授, 博士, E-mail: 1992876243@qq.com; 程根 (1990—), 男, 博士研究生, E-mail: chenggen90@163.com; †对本文贡献相同; 通信作者: 曹先维 (1962—), 男, 研究员, E-mail: caoxw@scau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200801); 农业部“现代农业产业(马铃薯)技术体系”团队项目 (CARS-09-ES18)

rates were performed as: K (98.22%) > C (71.89%) > P (68.75%) > N (56.85%). Straw mulching and K fertilization largely affected soil K balance. The K deficient amount was 163.80 kg/hm² without straw mulching and K fertilizer application. K deficient amount was effectively reduced by straw mulching and K fertilization, and even K had surplus with combined application of straw and K fertilizer. 【Conclusion】 The straw mulching pattern can reduce K fertilizer application amount and production cost, and relieve the dilemma of K fertilizer resource deficiency in China.

Key words: potato; nutrient release; nutrient balance; straw mulching; decomposition

马铃薯 *Solanum tuberosum* 是世界第 4 大粮食作物, 种植分布极其广泛。我国是世界马铃薯第 1 大生产国, 2011 年全国马铃薯种植面积 542.4 万 hm², 产量 8 829 万 t^[1]。马铃薯具有抗逆性强, 生长周期短的特性, 在提供营养全面的食物、保证粮食安全、提高能源安全、帮助农民脱贫致富和促进冬季农业发展等方面发挥了巨大作用, 在农业和农村经济中发挥更大的作用^[2]。2015 年我国确定马铃薯成为继水稻、小麦和玉米之后的第 4 大主粮, 为马铃薯产业发展带来良好契机。广东省位于南方冬作区, 有 130 多万 hm² 的耕地适宜冬种生产, 但目前种植面积只有 5.5 万 hm², 马铃薯产业发展潜力较大^[3-4]。

马铃薯是典型的喜钾作物, 每生产 1 000 kg 马铃薯块茎约需 K₂O 4.0~6.0 kg^[5]。K 是提高马铃薯产量和品质的最重要元素之一, 在细胞分化、淀粉合成、糖的运输、碳水化合物形成以及酶活性方面有重要作用, 施用钾肥还可提高作物抗逆性^[6-7]。但我国钾肥资源匮乏, 主要依赖于进口, 自给率约为 50%。我国是世界上第 1 大钾肥进口国, 钾肥价格居高不下, 因此寻求化学钾肥的替代品, 减少我国对化学钾肥特别是进口钾肥的依赖, 才能保证粮食安全^[8]。由于钾肥成本较高, 因此在实际生产中, 南方地区普遍存在氮、磷、钾肥施用不合理现象, 许多地区偏重施用氮、磷肥, 而少施钾肥^[9-10]。

中国主要作物秸秆种类有近 20 种, 占世界秸秆资源产量的 25% 左右^[11]。稻草是我国第一大作物秸秆, 其产量占全国农作物秸秆总量 1/5 以上, 2009 年全国稻草总产量为 18 443.04 万 t^[12]。稻草是一种重要的有机肥料资源, 含有丰富的有机碳以及 N、P、K 和中微量营养元素^[13]。稻草还田既可避免资源浪费和环境污染, 又能增强土壤肥力, 改善土壤理化性状, 提高作物产量和品质^[14-18]。我国南方冬作区马铃薯主要种植模式为早稻-晚稻-马铃薯水旱轮作, 前茬水稻为马铃薯的种植提供了充裕的稻草资源, 稻草覆盖覆土栽培已成为广东省马铃薯主要种植模式。稻草是 K 的重要有机来源之一,

那么, 覆盖的稻草究竟可为马铃薯生长提供多少 K 是值得关注的问题。鉴于此, 本试验在南方冬作区广东省惠东县进行稻草钾肥配施的盆栽试验, 为了充分接近于当地气候环境条件, 采用在田间进行盆栽试验的方式, 探求稻草养分释放特征及覆盖稻草对土壤养分平衡的影响, 为南方冬作区马铃薯生产中钾肥和稻草的合理利用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

试验于 2013 年 10 月至 2014 年 3 月在广东省惠东县平海镇径口村的国家马铃薯产业技术体系广州综合试验站进行。土壤类型为水稻土, 质地为轻壤土, 土壤 pH5.91, 土壤养分质量分数为: 有机质 26.38 g/kg、碱解 N 131.70 mg/kg、有效 P 96.88 mg/kg、全 K 18.98 g/kg、速效 K 110.35 mg/kg。

1.2 供试材料

供试种薯: 费乌瑞它, 一级脱毒种薯。

供试肥料: 氮肥为尿素, 其 $w(N)$ 为 46%; 磷肥为过磷酸钙, 其 $w(P_2O_5)$ 为 12%; 钾肥为硫酸钾, 其 $w(K_2O)$ 为 54%。

供试稻草: 晚稻稻草, 风干, 剪成 10~15 cm 小段, 储存备用。稻草养分的质量分数为: 全 C 41.01%, 全 N 8.51 g/kg, 全 P 0.98 g/kg 和全 K 17.10 g/kg。

1.3 试验方法

试验采用盆栽方式进行, 栽培容器为塑料花盆, 规格为 43 cm×29 cm×50 cm(上口径×下口径×高)。取 0~20 cm 耕作层水稻土, 风干, 过 5 mm 筛, 移栽时每盆装土(烘干基)20 kg, 苗高 10~15 cm 时再培土 5 kg。参照当地常规种植模式进行马铃薯育苗(2013 年 11 月 12 日), 育苗时不施用肥料和稻草, 当幼苗长至 3 片新叶后, 选取生长健壮、长势基本一致的薯苗移栽到花盆中(2013 年 12 月 2 日), 每盆种植 1 株, 深度为 8 cm。2~3 d 浇水 1 次, 灌水量依马铃薯不同生育时期对土壤相对含水量要求范围而定。

试验采用“3414”的部分实施方案^[19],即在适宜施用氮、磷肥的基础上,进行钾肥(记作 K_x)与稻草(记作 S_x)2 因素试验,4 个水平分别为 0 水平(不施用钾肥或稻草秸秆)、2 水平(钾肥或稻草秸秆适宜施用量)、1 水平(2 水平 $\times 0.5$)和 3 水平(2 水平 $\times 1.5$),完全随机排列,以不施钾肥和稻草的 K_0S_0 作对照(CK),共 9 个处理,具体见表 1,每处理 3 次重复,共 27 盆。肥料和稻草均采用一次性施入,稻草铺在土壤表面,上覆少量土壤。于 2014 年 2 月 22 日马铃薯收获时,全株采样;之后,把土样中的稻草全部挑拣出,用清水洗净、风干、称质量。把马铃薯植株和剩余稻草装入信封,105 °C 条件下烘 30 min 杀青,70 °C 条件下烘干至恒质量。磨碎,测定植株 N、P、K 及剩余稻草中 C、N、P、K 含量。

表 1 盆栽试验各处理的施肥和覆盖稻草量

Table 1 Amounts of fertilizer application and straw mulching in pot experiments $kg \cdot hm^{-2}$

处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	稻草 Paddy-rice straw
K_0S_0 (CK)	160.7	36.9	0	0
K_0S_2	160.7	36.9	0	6 000
K_1S_2	160.7	36.9	99.8	6 000
K_2S_2	160.7	36.9	199.7	6 000
K_3S_2	160.7	36.9	299.5	6 000
K_2S_0	160.7	36.9	199.7	0
K_2S_1	160.7	36.9	199.7	3 000
K_2S_3	160.7	36.9	199.7	9 000
K_1S_1	160.7	36.9	99.8	3 000

1.4 测定项目及计算公式

N、P、K 含量测定:样品经过 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化处理后,N 用奈氏比色法测定,P 用钼锑抗比色法测定,K 用火焰光度法测定^[20],稻草全 C 采用浓硫酸-重铬酸钾外加加热法测定^[20]。土壤有机质采用恒温水合热法,碱解 N 采用碱解扩散法,有效 P 采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[20]。

稻草腐解率=(施用稻草总量-残留稻草总量)/施用稻草总量 $\times 100\%$;

稻草养分累积释放量=施用稻草总干质量 \times 养分含量-残留稻草总干质量 \times 养分含量;

稻草养分累积释放率=稻草养分累积释放量/施入稻草总养分量 $\times 100\%$ 。

关于土壤养分平衡的计算公式^[21]:

土壤养分表观盈亏量=养分投入总量-作物带出土壤养分总量;

养分表观平衡系数=投入土壤中的养分/带出土壤中的养分;

养分实际平衡率=(输入养分-支出养分)/支出养分 $\times 100\%$ 。

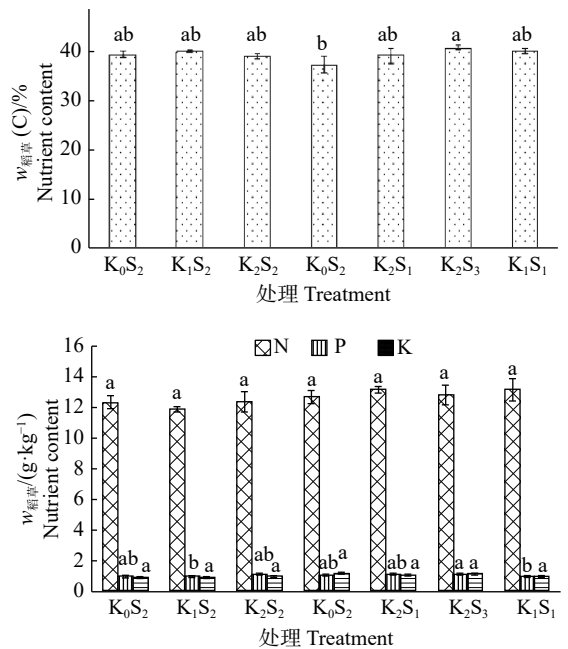
1.5 数据统计

采用 DPS14.10 统计软件^[22]和 Excel 对相关数据进行统计分析。采用 Duncan's 法对不同处理进行多重比较,若 $P < 0.05$,则具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 稻草钾肥配施对稻草养分含量的影响

稻草覆盖还田前各养分质量分数为:全 C 41.01%、全 N 8.51 g/kg、全 P 0.98 g/kg 和全 K 17.10 g/kg。马铃薯收获时(覆盖后 82 d),稻草养分含量状况见图 1,稻草 C 质量分数平均为 39.41%,稻草 N、P 和 K 质量分数平均分别为 12.64、1.06 和 1.03 g/kg。与覆盖前初始值相比,稻草中 C 和 P 含量变化较小,K 含量降低最为明显,降幅达到 93.96%,而 N 含量有较大增幅,较覆盖前增加了 49.22%。不同处理之间稻草 N 和 K 含量没有显著差异($P > 0.05$),而对稻草 C 和 P 含量产生一定影响。稻草 C、P 和 K 含量均以稻草施用量最多的处理 K_2S_3 (9 000 kg/hm^2) 最高,



各图中,相同指标柱子上方的不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$, Duncan's 法)

In each figure, different lowercase letters on bars of the same indicator indicated significant difference($P < 0.05$, Duncan's test)

图 1 稻草钾肥配施对稻草 C、N、P 和 K 含量的影响
Fig. 1 Influences of combined application of straw and K fertilizer on C, N, P, K contents of rice straw

其中, 稻草 C 含量显著高于 K_0S_2 处理 ($P<0.05$), P 含量显著高于 K_1S_2 处理 ($P<0.05$).

2.2 稻草钾肥配施对稻草养分累积释放量的影响

从表 2 可看出, 稻草养分累积释放量与钾肥用量无关, 只与稻草用量有关, 且随着稻草用量的增加, 养分累积释放量也逐渐增多。各处理稻草养分累积释放量表现为: $C>K>N>P$ 。稻草用量为 K_2S_3 处理水平 ($9\ 000\text{ kg/hm}^2$) 时, 稻草各养分累积释放量分别为: C $2\ 221.43\text{ kg/hm}^2$ 、N 36.58 kg/hm^2 、P 4.94 kg/hm^2 和 K 152.74 kg/hm^2 , 均显著高于 S_2 处理 ($6\ 000\text{ kg/hm}^2$) 和 S_1 处理 ($3\ 000\text{ kg/hm}^2$) 水平养分释放量 ($P<0.05$)。稻草施用量为 S_2 处理水平时, 养分累积释放量均显著高于 S_1 处理水平 ($P<0.05$)。稻草养分累积释放量与稻草用量规律基本一致,

S_3 、 S_2 、 S_1 处理水平的 C、N、P 和 K 累积释放总量均表现为近似 3:2:1 的倍比关系。覆盖稻草可为土壤提供大量养分, 尤以 C 和 K 居多, 在马铃薯生长期, 每覆盖 100 kg 稻草平均有 N 0.42 kg , P 0.14 kg (P_2O_5), K 1.70 kg (K_2O) 进入到土壤中。种植马铃薯需要较多的肥料投入才能满足作物需求, 单纯依靠施用化肥, 不仅增加成本, 而且易造成肥料利用率低下和污染环境。可见, 在保证产量的前提下, 覆盖稻草可减少化肥投入, 培肥土壤。

2.3 稻草钾肥配施对稻草腐解率和养分累积释放率的影响

由图 2 可看出, 稻草腐解率和养分累积释放率不受稻草和钾肥用量的影响 ($P>0.05$)。稻草还田 82 d 后 (收获时) 稻草平均腐解率为 70.87%, C 和

表 2 马铃薯收获时稻草养分累积释放量¹⁾

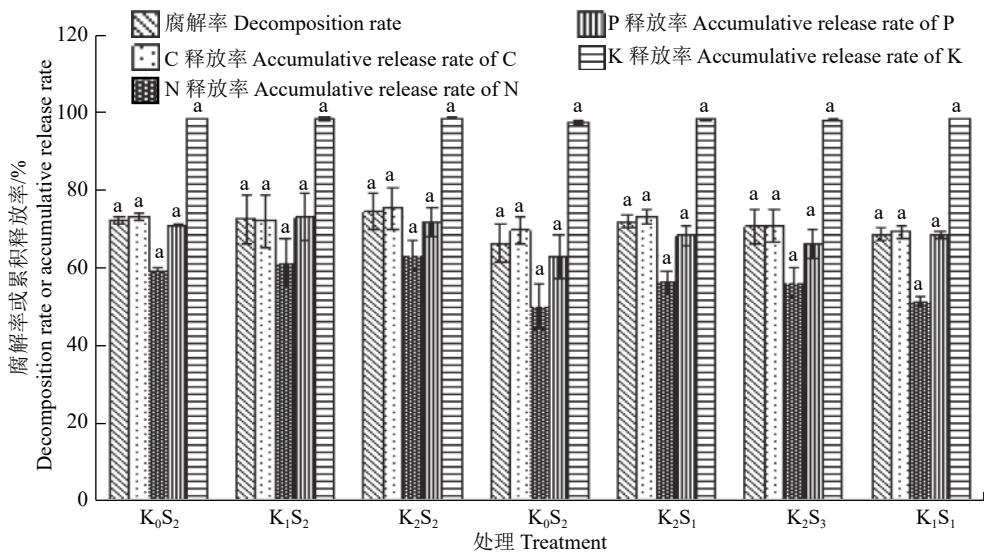
Table 2 Accumulative release amounts of nutrients at harvesting period of potato

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	C	N	P	K
K_0S_2	$1\ 528.69\pm 19.86b$	$25.76\pm 0.14b$	$3.55\pm 0.02b$	$102.32\pm 0.01b$
K_1S_2	$1\ 508.22\pm 140.85b$	$26.60\pm 3.96b$	$3.65\pm 0.31b$	$102.35\pm 0.39b$
K_2S_2	$1\ 573.74\pm 109.86b$	$27.39\pm 2.30b$	$3.58\pm 0.19b$	$102.35\pm 0.23b$
K_3S_2	$1\ 456.05\pm 75.99b$	$24.39\pm 1.96b$	$3.15\pm 0.28b$	$101.47\pm 0.48b$
K_2S_1	$764.81\pm 19.93c$	$12.23\pm 0.69c$	$1.70\pm 0.07c$	$51.07\pm 0.12c$
K_2S_3	$2\ 221.43\pm 135.76a$	$36.58\pm 2.90a$	$4.94\pm 0.28a$	$152.74\pm 0.46a$
K_1S_1	$723.99\pm 17.39c$	$11.13\pm 0.64c$	$1.71\pm 0.03c$	$51.03\pm 0.02c$

1)表中数据为3次重复的平均值±标准误, 同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's法)

1) Data were averages of triplicate samples ± standard deviations ($n = 3$), and different lowercase letters in the same column indicated significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)



相同指标柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

Different lowercase letters on bars of the same indicator indicated significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)

图 2 稻草钾肥配施对稻草腐解率及 C、N、P 和 K 累积释放率的影响

Fig. 2 Influences of combined application of paddy-rice straw and K fertilizer on paddy-rice decomposition rates and accumulative release rates of C, N, P, K

P 累积释放率与稻草腐解率相当, 分别为 71.89% 和 68.75%; N 释放率低于稻草腐解率, 为 56.85%, 各元素中以 K 最容易释放, 累积释放率高达 98.22%。可以看出, 马铃薯收获时覆盖稻草的大部分养分已释放土壤中, 供给作物利用。

2.4 稻草钾肥配施对土壤 N 平衡的影响

由表 3 可知, 无论是否施用钾肥和稻草, 土壤 N 均处于大量盈余状态, 覆盖稻草 (K_0S_2 处理) 不仅增加了 N 投入量, 而且显著降低了土壤 N 支出量 ($P < 0.05$), 从而显著增加了土壤 N 表观盈余量 ($P < 0.05$),

而施用钾肥对土壤 N 支出量及土壤 N 盈余状况没有显著影响 ($P > 0.05$)。覆盖稻草处理土壤 N 盈余量均在 $100 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以上, 表观平衡系数大于 2.00, 实际平衡率高于 120%, 且随着稻草施用量增加而增加。各施肥处理中, 以稻草施入量最大的 K_2S_3 处理 ($9000 \text{ kg}/\text{hm}^2$) N 盈余量最多, 达到 $150.28 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 显著高于其余处理 ($P < 0.05$), 表观平衡系数为 3.01, N 实际平衡率也高达 200.91%。所以在实际生产过程中, 在稻草覆盖还田情况下应适当减少氮肥投入量, 以避免造成资源浪费和污染生态环境。

表 3 稻草钾肥配施对土壤 N 平衡的影响¹⁾

Table 3 Influences of combined application of paddy-rice straw and K fertilizer on soil N balance

处理 Treatment	投入量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ Input amount		支出量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Output amount	表观盈亏量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ Apparent surplus and deficient amount	表观平衡系数 Apparent balance coefficient	实际平衡率/% Actual equilibrium rate
	化学N Chemical N	稻草N Straw N				
K_0S_0	160.65	0	89.20a	$71.45 \pm 1.34e$	1.80	80.19
K_0S_2	160.65	43.35	74.43b	$129.57 \pm 3.62b$	2.76	175.42
K_1S_2	160.65	43.35	88.63a	$115.37 \pm 7.56bc$	2.33	133.34
K_2S_2	160.65	43.35	73.63ab	$130.37 \pm 4.12b$	2.78	178.77
K_3S_2	160.65	43.35	77.41ab	$126.59 \pm 9.37b$	2.72	171.59
K_2S_0	160.65	0	83.97ab	$76.68 \pm 0.29e$	1.91	91.33
K_2S_1	160.65	21.68	82.01ab	$100.31 \pm 1.54d$	2.23	122.47
K_2S_3	160.65	65.03	75.40ab	$150.28 \pm 3.78a$	3.01	200.91
K_1S_1	160.65	21.68	80.42ab	$101.90 \pm 2.54cd$	2.27	127.15

1) 表中数据为 3 次重复的平均值 \pm 标准误, 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)

1) Data were averages of triplicate samples \pm standard deviations ($n = 3$), and different lowercase letters in the same column indicated significant difference ($P < 0.05$, Duncan's test)

2.5 稻草钾肥配施对土壤 P 平衡的影响

马铃薯收获后, 土壤 P 平衡状况见表 4。覆盖稻草和施用钾肥对土壤 P 支出量没有显著影响, 马铃薯对 P 的需求量远低于 N, 由于磷的施用量比较少, 因此土壤 P 相对盈余量也明显小于 N。 K_0S_0 处理土壤 P 盈余量最小, 为 $2.58 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。覆盖稻草会显著增加土壤 P 盈余 ($P < 0.05$), 提高 P 表观平衡系数和实际平衡率, 而施用钾肥对土壤 P 盈余状况影响不显著 ($P > 0.05$)。以稻草用量最多的 K_2S_3 处理 ($9000 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 土壤 P 表观盈余量最多, 除 K_2S_0 和 K_2S_1 处理外, 其余处理土壤 P 表观盈余量均显著高于 K_0S_0 处理。稻草 P 含量远低于 N, 因此对土壤 P 平衡状况的影响也远小于对 N 的影响。

2.6 稻草钾肥配施对土壤 K 平衡的影响

由表 5 可知, 施入钾肥和覆盖稻草对土壤-作物系统 K 平衡影响较大。仅施氮磷肥 (K_0S_0 处理) 的土壤 K 亏缺量最大, 亏缺达到 $163.80 \text{ kg}/\text{hm}^2$,

耗竭严重。仅覆盖稻草 (K_0S_2 处理) 无法满足马铃薯对 K 的需求, K 亏缺量为 $90.40 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 表观平衡系数为 0.49, 实际平衡率为 -50.64% ; 施用钾肥的 K_2S_0 处理土壤 K 亏缺量显著减少 ($P < 0.05$), 但亏缺量仍有 $20.28 \text{ kg}/\text{hm}^2$, K 表观平衡系数为 0.90, 实际平衡率为 -10.47% ; 而稻草和钾肥配合施用可有效减少土壤 K 亏缺量。当钾肥和稻草覆盖量为 K_2S_1 处理水平时, 土壤 K 基本收支平衡, 表观平衡系数为 1.01, 实际平衡率为 1.16%。继续增加稻草或钾肥用量可使土壤 K 盈余, 其中 K_2S_2 和 K_2S_3 处理的土壤 K 盈余量分别为 $74.70 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $93.78 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。当稻草钾肥用量提高到 K_3S_2 处理水平时, 土壤盈余量最大, 达到 $156.58 \text{ kg}/\text{hm}^2$, K 表观平衡系数为 1.91, K 实际平衡率为 94.73%, 显著高于其他施肥处理 ($P < 0.05$)。钾肥和稻草配施是维持土壤 K 平衡的较好途径, 既利用了有机肥料资源, 又减少了钾肥的投入量, 有利于提高马铃薯收益。

表 4 稻草钾肥配施对土壤 P 平衡的影响¹⁾

Table 4 Influences of combined application of paddy-rice straw and K fertilizer on soil phosphorus balance

处理 Treatment	投入量/(kg·hm ⁻²) Input amount		支出量/ (kg·hm ⁻²) Output amount	表观盈亏量/(kg·hm ⁻²) Apparent surplus and deficient amount	表观平衡系数 Apparent balance coefficient	实际平衡率/% Actual equilibrium rate
	化学P	稻草P				
	Chemical P	Straw P				
K ₀ S ₀	16.11	0	13.53a	2.58±0.07d	1.19	19.09
K ₀ S ₂	16.11	5.0	12.77a	8.33±1.33ab	1.69	50.60
K ₁ S ₂	16.11	5.0	15.01a	6.1±1.18bc	1.42	42.32
K ₂ S ₂	16.11	5.0	11.47a	9.64±1.76a	1.95	59.84
K ₃ S ₂	16.11	5.0	12.77a	8.34±1.59ab	1.71	49.99
K ₂ S ₀	16.11	0	12.87a	3.24±0.78cd	1.26	26.08
K ₂ S ₁	16.11	2.5	13.07a	5.54±0.45bcd	1.43	42.74
K ₂ S ₃	16.11	7.5	12.98a	10.63±0.48a	1.82	82.34
K ₁ S ₁	16.11	2.5	12.48a	6.13±0.77bc	1.50	50.21

1)表中数据为3次重复的平均值±标准误,同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's法)

1) Data were averages of triplicate samples ± standard deviations ($n = 3$), and different lowercase letters in the same column indicated significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)

表 5 稻草钾肥配施对土壤 K 平衡的影响¹⁾

Table 5 Influences of combined application of paddy-rice straw and K fertilizer on soil potassium balance

处理 Treatment	投入量/(kg·hm ⁻²) Input amount		支出量/ (kg·hm ⁻²) Output amount	表观盈亏量/(kg·hm ⁻²) Apparent surplus and deficient amount	表观平衡系数 Apparent balance coefficient	实际平衡率/% Actual equilibrium rate
	化学K	稻草K				
	Chemical K	Straw K				
K ₀ S ₀	0	0	163.80b	-163.80±2.36f	0	-100.00
K ₀ S ₂	0	86.60	177.01ab	-90.40±13.68e	0.49	-50.64
K ₁ S ₂	83.19	86.60	214.60a	-44.81±16.21d	0.80	-20.26
K ₂ S ₂	166.38	86.60	178.28ab	74.70±23.28b	1.45	45.39
K ₃ S ₂	249.56	86.60	179.59ab	156.58±28.92a	1.95	94.73
K ₂ S ₀	166.38	0	186.66ab	-20.28±10.75cd	0.90	-10.47
K ₂ S ₁	166.38	43.30	207.44ab	2.24±5.09c	1.01	1.16
K ₂ S ₃	166.38	129.90	202.50ab	93.78±4.32b	1.46	46.40
K ₁ S ₁	83.19	43.30	183.02ab	-56.53±13.26de	0.70	-30.41

1)表中数据为3次重复的平均值±标准误,同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's法)

1) Data were averages of triplicate samples ± standard deviations ($n = 3$), and different lowercase letters in the same column indicated significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)

3 讨论与结论

本研究结果表明,至马铃薯收获时稻草中 C 含量略有降低,而 N、P 含量显著增加, K 含量降低最为明显,该研究结果与闫超等^[23]研究结果类似。N 含量增加一方面可能是因为土壤微生物在生命活动过程中每吸收一份 C 素需要消耗 4~5 份 C^[24],导致秸秆矿化过程中 C 的损失高于 N,另一方面可能与稻草可强烈吸附土壤中的 N 有关^[24],因此覆盖稻草可有效减少 N 素淋洗,对提高 N 利用效率具有重要意义。稻草各养分累积释放率大小次序为:

K>C>P>N,收获时稻草腐解率平均达到 70.87%, C、N 和 P 释放率分别为 71.89%、56.85% 和 68.75%, K 为 98.22%。秸秆的降解受到温度^[24]、湿度^[25]、土壤类型^[26]以及土壤微生物^[27]等环境因素的影响,本试验设在南方冬作区,灌溉水较多,温度较为适宜,较利于稻草腐解,因此稻草腐解率和养分释放率高于前人研究结果^[28-29]。秸秆中 K 释放最快,主要是因为秸秆中 K 含量较高并且主要以离子态存在,易溶于水,释放较快。秸秆中的 P 素 60% 以上以离子态存在,其余一部分参与细胞壁的构成,释放速率慢于 K 素,且由于秸秆中含 P 较低,

P 释放量较少。C、N 主要以有机态存在,构成秸秆主体部分,胶结程度高,在物理作用下不易分解,释放速率较慢^[30]。本研究结果显示,稻草腐解后各养分累积释放量为:C>K>N>P,稻草用量只影响养分释放量,而对养分释放率和稻草腐解率没有影响,在稻草推荐施用量(6 000 kg/hm²)下,覆盖的稻草可为作物提供 N 25.2 kg/hm²、P 8.4 kg/hm²(P₂O₅)、K 102 kg/hm²(K₂O),高于张亮^[31]的研究结果,这可能主要与本试验稻草养分释放率较高有关。

鲁如坤等^[32]对我国南方6省农田养分平衡现状进行研究,发现N处于盈余过量且有继续增大的趋向,N的大量盈余对节约能源或保护环境都是不利的。P一般也处于盈余状态,特别在我国某些省区也存在盈余过大的问题,福建、广东、广西3省区的K就处于盈余状态。一般来说,农田N盈余超过20%以上时,即可能对环境造成危害,一般允许盈余50%^[33],而广东、福建2省盈余竟全部达到185%以上,P盈余达到300%以上,造成严重浪费,并可能导致污染环境。由于我国钾肥资源匮乏,国内生产的钾肥难以满足我国对钾肥的需求^[8],在农田缺K显著的情况下,K盈余30%~50%尚可,显然广东、福建等省K盈余超过50%是非常不合理的。本试验研究结果表明,南方早稻-晚稻-马铃薯水旱轮作种植模式下,土壤中N处于大量盈余状态。稻草覆盖处理土壤N实际平衡率高于120%,盈余量在100 kg/hm²以上;P略有盈余,P实际平衡率在50%左右,盈余量较小,为5~10 kg/hm²,说明N盈余严重,而P盈余状况尚可接受^[33]。施用稻草可增加土壤N和P盈余量,因此在稻草覆盖还田后,应开展氮肥和磷肥减量的研究。不施钾肥和稻草,土壤K亏缺量达到163.80 kg/hm²,耗竭严重。施用稻草或钾肥均可有效缓解土壤K亏损趋势,稻草和钾肥配合施用可使土壤K收支平衡甚至盈余。当钾肥和稻草用量为K₂S₁处理水平时,土壤K收支平衡,实际平衡率为1.16%,继续增加可盈余土壤K,与前人研究结果一致^[21, 34]。覆盖稻草不仅有利于维持土壤养分平衡,而且在实际生产中覆盖稻草情况下可适当减少钾肥施用量,降低生产成本,对我国农业可持续发展具有重要意义。

综上所述,稻草覆盖还田82 d后,稻草的腐解率为70.87%。稻草中C含量略有降低,而N和P含量显著提高,K含量则显著下降。稻草K累积释放率最大,C次之,P和N较慢,但也均在55%以上。N、P、K三要素中稻草含K量最高,因而K累积释放量也最大,远远高于N和P,说明稻草覆盖

还田对土壤K贡献最大。覆盖稻草可显著增加土壤N盈余量,而对土壤P影响较小。不施钾肥和稻草土壤的K亏缺严重,覆盖稻草或施用钾肥可有效缓解土壤K亏缺,稻草和钾肥配施可使土壤K收支平衡,若继续增加稻草或钾肥用量,可使土壤K盈余。

参考文献:

- [1] 屈冬玉. 马铃薯产业应在我国农村区域经济发展中发挥更大作用[C]//中国马铃薯作物学会马铃薯专业委员会. 马铃薯产业与农村区域发展. 北京: 中国作物学会, 2013: 1-3.
- [2] 谢开云, 屈冬玉, 金黎平, 等. 中国马铃薯生产与世界先进国家的比较[J]. 世界农业, 2008, 29(5): 35-38.
- [3] 米健, 罗其友, 高明杰. 南方冬作区马铃薯发展趋势、区域格局与增产潜力[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(3): 73-79.
- [4] 屈冬玉, 金黎平, 谢开云. 中国马铃薯产业10年回顾[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010: 66-69.
- [5] 高媛, 韦艳萍, 樊明寿. 马铃薯的养分需求[J]. 中国马铃薯, 2011, 25(3): 182-187.
- [6] MULDER A. Potato diseases-diseases, pests and defects[M]. Holland: Aardappelwereld B V and NIVAP, 2005: 209-221.
- [7] GEORGE M S, LU G, ZHOU W. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.)[J]. Field Crop Res, 2002, 77(1): 7-15.
- [8] 自由路. 高价格下我国钾肥的应变策略[J]. 中国土壤与肥料, 2009, 45(3): 1-4.
- [9] 陈杨, 樊明寿, 李斐, 等. 氮素营养诊断技术的发展及其在马铃薯生产中的应用[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 66-71.
- [10] 张新明, 张洪秀, 李水源, 等. 恩平市典型种植户冬作马铃薯施肥状况调查分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22286-22288.
- [11] LAL R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. Environ Int, 2005, 31(4): 575-584.
- [12] 毕于运, 王红彦, 王道龙, 等. 中国稻草资源量估算及其开发利用[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 137-143.
- [13] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化和有机复混肥的生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 1-20.
- [14] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826-1831.
- [15] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 施钾和秸秆还田对栗钙土区土壤养分及小麦产量的长期效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 194-198.
- [16] 张静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 612-619.
- [17] CARUSO G, CARPUTO D, CONTI S, et al. Effect of

- mulching and plant density on out-of-season organic potato growth, yield and quality[J]. *Adv Hort Sci*, 2013, 27(3): 115-121.
- [18] DVORAK P, KUCHTOVA P, TOMASEK J. Response of surface mulching of potato (*Solanum tuberosum*) on SPAD value, colorado potato beetle and tuber yield[J]. *Int J Agric Biol*, 2013, 15(4): 798-800.
- [19] 农业部办公厅. 农业部关于印发《测土配方施肥技术规范(2011年修订版)》的通知: 农农发[2011]3号[A]. (2011-09-22)[2018-11-02]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201109/t20110922_2293389.htm.
- [20] 鲍士旦. 土壤融化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 王志勇, 白由路, 杨俐苹, 等. 低土壤肥力下施钾和秸秆还田对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 900-906.
- [22] TANG Q, ZHANG C. Data processing system (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research[J]. *Insect Sci*, 2013, 20(2): 254-260.
- [23] 闫超. 水稻秸秆还田腐解规律及对土壤养分和酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [24] 李世清, 李生秀. 有机物料在维持土壤微生物体氮库中的作用[J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 136-142.
- [25] ABRO S A, TIAN X H, WANG X D, et al. Decomposition characteristics of maize (*Zea mays* L.) straw with different carbon to nitrogen (C/N) ratios under various moisture regimes[J]. *Afr J Biotechnol*, 2011, 10(50): 10149.
- [26] SUN B, WANG X, WANG F, et al. Assessing the relative effects of geographic location and soil type on microbial communities associated with straw decomposition[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2013, 79(11): 3327-3335.
- [27] LU P, LIN Y H, YANG Z Q, et al. Effects of application of corn straw on soil microbial community structure during the maize growing season[J]. *J Basic Microbiol*, 2015, 55(1): 22-32.
- [28] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 374-380.
- [29] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272-276.
- [30] 张晋京, 窦森. 玉米秸秆分解期间胡敏酸、富里酸动态变化的研究[J]. *土壤通报*, 2005(1): 134-136.
- [31] 张亮. 关中麦玉轮作区施氮对秸秆还田小麦产量和秸秆养分释放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [32] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方6省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(2): 63-67.
- [33] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究: IV: 农田养分平衡的评价方法和原则[J]. *土壤通报*, 1996, 27(5): 197-199.
- [34] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施肥与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 133-139.

【责任编辑 李晓卉】