

DOI: 10.11686/cyxb2024165

http://cyxb.magtech.com.cn

李绍兴, 宋稳锋, 周玉玲, 等. 秸秆与紫云英覆盖对土壤-微生物-甘薯植株生态化学计量特征的影响. 草业学报, 2025, 34(3): 56—70.

LI Shao-xing, SONG Wen-feng, ZHOU Yu-ling, et al. Effects of straw and milk vetch mulching on the ecological stoichiometric characteristics of soil-microbe-sweet potato plants. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 56—70.

秸秆与紫云英覆盖对土壤-微生物-甘薯植株生态化学计量特征的影响

李绍兴^{**}, 宋稳锋^{**}, 周玉玲, 宋李霞, 任可, 马群, 王龙昌^{*}

(西南大学农学与生物科技学院, 南方山地农业教育部工程研究中心, 重庆 400715)

摘要: 针对西南旱作农业区水土流失、耕地质量低下等问题, 亟须探索农业可持续耕作措施, 缓解养分限制。以西南地区“蚕豆/玉米/甘薯”早三熟套作模式中的甘薯田为研究对象, 作物前茬秸秆作为覆盖还田材料, 设置4个处理: 无覆盖(CK)、秸秆覆盖(S)、秸秆+紫云英覆盖(S+M)、紫云英覆盖(M), 通过对土壤-微生物-甘薯植株碳、氮、磷含量、生态化学计量特征以及内稳性指数的研究, 揭示秸秆和紫云英覆盖对土壤养分限制及生态化学计量特征的影响规律。结果表明: 1) 秸秆与紫云英覆盖处理显著提高土壤有机碳和全氮含量, 从土壤化学计量比的变化发现覆盖处理能有效缓解当地土壤养分限制。2) 秸秆与紫云英覆盖处理显著提高了土壤微生物量碳、氮和磷含量, 不同生育时期微生物化学计量比有所差异, 生育前期波动较大, 中后期相对稳定。内稳性特征方面, 除CK处理外, 微生物与土壤化学计量比之间呈现出严格的内稳性特征。3) 秸秆与紫云英覆盖处理显著提高了甘薯各器官氮含量, 其中以秸秆与紫云英协同覆盖处理效果最佳。甘薯产量表现为S+M>S>M>CK。化学计量比方面, S+M处理有利于延长甘薯生长时间, 有效缓解养分限制状况。甘薯植株各器官化学计量比在整个生育期内均表现为严格的稳态。综上所述, 在西南旱作农业区通过进行秸秆与紫云英覆盖, 可以提升甘薯产量, 调节土壤养分限制, 土壤与微生物化学计量比均保持严格的内稳态。

关键词: 秸秆覆盖; 紫云英覆盖; 甘薯; 化学计量特征; 内稳性

Effects of straw and milk vetch mulching on the ecological stoichiometric characteristics of soil-microbe-sweet potato plants

LI Shao-xing^{**}, SONG Wen-feng^{**}, ZHOU Yu-ling, SONG Li-xia, REN Ke, MA Qun, WANG Long-chang^{*}

College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, Chongqing 400715, China

Abstract: There is an urgent need to explore sustainable agricultural cultivation measures and alleviate nutrient limitations as a response to the problems of soil erosion and low quality of cultivated land in the dry-farming areas of southwest China. This study focused on sweet potato plantings within a “fava bean (*Vicia faba*)/corn (*Zea mays*)/sweet potato (*Ipomoea batatas*)” rain-fed three-crop rotation pattern in southwest China. Four treatments were set up: no mulching (CK), straw mulching (S), straw and milk vetch (*Astragalus sinicus*) mulching (S+M) and milk vetch mulching (M). By studying the content of carbon, nitrogen and phosphorus, ecological stoichiometric

收稿日期: 2024-05-07; 改回日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871583)资助。

作者简介: 李绍兴(2002—), 男, 四川会东人, 在读硕士。E-mail: lsxkeenlq@163.com; 宋稳锋(1997—), 男, 安徽亳州人, 硕士。E-mail: 1373106606@qq.com. ** 共同第一作者 These authors contributed equally to this work.

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wanglc2003@163.com

characteristics and the homeostasis index of the soil-microbe-sweet potato plant stoichiometric data, the effects of straw and milk vetch mulching cover on soil nutrient restriction and ecological stoichiometric characteristics were explored. It was found that: 1) The straw and milk vetch mulching treatments significantly increased soil organic carbon and total nitrogen content, and from changes in the soil stoichiometric ratio, it was deduced that the mulching treatments effectively alleviated soil nutrient restriction. 2) The straw and milk vetch mulching treatments significantly increased the content of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus, and showed differences in the C-N-P stoichiometric ratios of microorganisms at different crop growth stages, with large fluctuations in the early growth period, and relatively stable values in the middle and late growth period. In terms of homeostasis characteristics, except for the CK treatment, the microbial and soil stoichiometric ratios showed strong homeostasis. 3) The nitrogen content of sweet potato organs was significantly increased by straw and milk vetch mulching treatments, and the best effect was achieved in the S+M mulching treatment. The yields of sweet potato were ranked S+M>S>M>CK. In terms of stoichiometric ratio, S+M treatment was superior. This treatment prolonged the growth time of sweet potato, and effectively alleviated the nutrient restriction. The stoichiometric ratio of various organs of sweet potato plants showed strong homeostasis during the whole crop growth period. In summary, in the dry-farming areas of southwest China, crop mulching with straw and milk vetch improved the yield of sweet potato, regulated soil nutrient limitations and resulted in a stable homeostasis in the stoichiometric ratios of soil and microorganisms.

Key words: straw mulching; milk vetch mulching; sweet potato; stoichiometric characteristics; homeostasis

作为我国生物种类和生态系统最为丰富的地区之一,西南地区拥有适宜农业生产的自然资源及生态环境,但由于全区近95%的土地面积为山地丘陵,山高坡陡、地块分散的耕地类型使得地表物质稳定性差、水土流失严重^[1]。高岩红等^[2]对渝西南典型农田有机碳密度的调查表明,紫色土作为该地区的主要土壤类型,其有机碳密度仅为 $2.49 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,远低于全国的平均水平($3.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$),这和紫色土易风化、土层浅薄的基础特质有关。近些年来,人口数量的增长加剧了人地之间的矛盾,高强度的土地利用造成土壤质量下降^[3],如何缓解水肥流失问题、促进农田生态持续健康发展成为当前西南旱作区面对的重大课题。

生物覆盖、有机物还田等农田管理方法是基于农业可持续发展理念的土地利用实践和生物工程措施^[4]。农田系统中的生物覆盖材料主要包括作物秸秆、豆科绿肥、杂草及有机肥料等^[5-6],生物覆盖可以有效地减少地表径流损失,增加雨水下渗,提高土壤水分利用效率^[5];保护土壤结构^[7];同时培肥土壤,提高作物产量^[8]。近年来的一些研究指出,长期单独秸秆还田会增加土壤碳氮比,不利于作物增产,通过增施化肥可以改善土壤元素计量比的失衡,绿肥生长过程中通过生物固氮途径获得大量氮素积累,其秸秆通常具有较低的碳氮比,绿肥与秸秆的多元化还田处理是更为生态、经济的保护性耕作措施^[6]。生态化学计量学是一门将生态学和化学计量学结合起来的新兴学科^[9],通过研究生态过程中多重化学元素平衡及其耦合关系,把生物界不同层次水平的结果结合起来,从而为生态学的研究提供了理论工具和思想框架^[10]。生态化学计量学的概念提出后,生态学家在验证不同生态系统是否存在恒定的生态化学计量学特征、生态系统限制养分的判断以及C:N:P与生物生长率的关系等方面展开研究,取得奠基性的成果。随着生态化学计量学的逐渐兴起,我国学者近年来也展开相关研究,主要集中于森林、草原、湿地生态系统,包括对生态化学计量特征及其驱动因素、养分限制规律、内稳性特征等,但关于农田生态系统方面的研究尚不多见^[11]。

基于此,本研究以“蚕豆(*Vicia faba*)/玉米(*Zea mays*)/甘薯(*Ipomoea batatas*)”早三熟套作模式中的甘薯田为对象,探究秸秆覆盖、紫云英(*Astragalus sinicus*)覆盖及秸秆紫云英协同覆盖处理下土壤、微生物以及甘薯植株碳(carbon, C)、氮(nitrogen, N)、磷(phosphorus, P)含量的变化规律及元素计量关系。从生态化学计量学的角度出发,阐明土壤、微生物、作物方面对于不同覆盖措施响应规律,以期为探索西南地区可持续耕作措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点为重庆市北碚区西南大学紫色土试验基地长期保护性耕作定位试验点(29°51' N, 106°27' E, 海拔244 m), 属亚热带季风湿润气候区, 年均太阳总辐射量 87108 kJ·cm⁻², 年均总日照时数 1276.7 h, 多年平均气温 18 °C, ≥10 °C 积温 5979.5 °C, 夏季最高气温达 40 °C 左右, 无霜期 359 d, 多年平均降水量 1133.7 mm。试验地土壤为旱地紫色土, 坡度较缓, 地力相对均匀。

1.2 试验设计

于 2018 年 11 月至 2022 年 11 月连续 4 年开展生物覆盖田间试验, 种植制度为“蚕豆/玉米/甘薯”早三熟套作, 以套作作物中的甘薯农田为研究对象, 设置 4 个处理: 无覆盖(CK)、秸秆覆盖(S)、秸秆+紫云英覆盖(S+M)、紫云英覆盖(M), 具体操作方法见表 1。试验测定时间为 2022 年 6—11 月。

表 1 不同生物覆盖处理及操作方法

Table 1 Treatment and operation methods of different biological coverage

处理 Treatment	操作方法 Method of operation
对照 Control (CK)	地表无覆盖。Uncovered land.
秸秆覆盖 Straw mulching (S)	当季作物播种或移栽后, 将前茬作物秸秆用铡刀切成 20 cm 左右长度并均匀覆盖在整个小区内, 蚕豆、玉米秸秆覆盖量为 7500 kg·hm ⁻² (风干重), 甘薯秸秆覆盖量为 4500 kg·hm ⁻² (风干重)。After planting or transplantation of crops in the current season, straw of the previous crops were cut into a length of about 20 cm by fodder chopper and evenly covered in the whole plot. The straw cover amount of fava bean and corn were 7500 kg·ha ⁻¹ (air-dry weight), and the straw cover amount of sweet potato was 4500 kg·ha ⁻¹ (air-dry weight).
紫云英覆盖 Milk vetch mulching (M)	在蚕豆生育期间间作紫云英, 紫云英于盛花期收获并切碎, 在玉米移栽后均匀覆盖在整个小区内, 覆盖量为 2500 kg·hm ⁻² (风干重)。During the growth period of fava bean, harvest and chop the milk vetch in full-blossom period, evenly covered in the whole plot after corn was transplanted, and the cover amount is 2500 kg·ha ⁻¹ (air-dry weight).
秸秆+紫云英覆盖 Straw and milk vetch mulching (S+M)	秸秆覆盖量和覆盖方法同 S, 紫云英覆盖量和覆盖方法同 M。The mulching amount and mulching method of straw and milk vetch are the same as S and M.

采用随机区组排列, 每个处理重复 3 次, 共 12 个小区, 小区面积为 32 m² (4 m×8 m)。每个小区均分成 4 厢共 8 个条带, 每个条带宽度为 1 m, 长度为 4 m。甘薯供试品种为“渝红心薯 98”, 采用育苗移栽, 利用薯块育苗繁殖出甘薯苗, 采用斜插法移栽, 每条带种植 2 行, 行距 65 cm, 株距 25 cm, 每行 8 株, 每窝 1 株, 窝深 10 cm, 各处理复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)施用量均为 225 kg·hm⁻², 于甘薯移栽后一周作为基肥穴施, 整个生育期内不灌水, 其他田间管理措施同常规。以一年为例, 田间种植安排如图 1 所示, 蚕豆生育期间间作紫云英, 玉米先后与蚕豆和甘薯套作。蚕豆播种前对试验地翻耕, 整个套作周期内实行免耕。

月份 Month	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
种植安排 Planting arrangements	蚕豆 Fava bean						甘薯 Sweet potato						
	紫云英 Milk vetch						玉米 Corn						

图 1 田间种植安排

Fig. 1 Field planting arrangements

1.3 样品采集

在甘薯生长 30、60、90、120 及 150 d 取样, 选取不同处理小区内生长状况一致的 3 株甘薯植株连根带土挖出, 将表面大块松散的土抖落弃掉, 剩下的附着在根系表面、黏附力强的土为根际土, 继续抖根收集根际土, 将 3 株甘

薯根际土混合采用四分法收集约300 g。同时在每个小区的甘薯条带采用5点取样法、四分法收集10 cm土层的非根际土壤约300 g。将采集的土样分成两份,一份自然风干,另一份过2 mm筛后放在4℃冰箱保存,用于测定土壤及微生物生物量。取完土壤后收集甘薯植株,用蒸馏水冲洗干净并将植株各部分器官分开、装袋,在105℃下杀青30 min,75℃烘干至恒重测定甘薯植株生物量。

1.4 指标测定

土壤有机碳及甘薯各器官全碳采用重铬酸钾—硫酸溶液氧化—硫酸亚铁标准溶液滴定法测定,土壤全氮采用浓H₂SO₄消煮—凯氏定氮法测定,土壤全磷采用浓H₂SO₄—HClO₄消煮—钼锑抗比色法^[12]测定,计算土壤C:N、C:P和N:P化学计量比(质量比)。微生物量碳、氮、磷采用氯仿熏蒸法^[13-15]测定,计算土壤微生物MBC:MBN、MBC:MBP和MBN:MBP化学计量比(质量比)。甘薯各器官采用H₂SO₄—H₂O₂消煮,凯氏定氮法测氮,钼锑抗比色法测磷^[16],计算甘薯植株C:N、C:P和N:P化学计量比(质量比)。

甘薯产量测定于成熟收获期采集未进行取样甘薯条带内的全部薯块,除尽块根表面的土壤及多余的茎,称量薯块总鲜重并折合总产量。

1.5 内稳性指数

参照Makino等^[17]和Persson等^[18]的方法计算植物和微生物与土壤之间的内稳性指数,计算公式如下:

$$H = \frac{\ln x}{\ln y - \ln c}$$

式中:H表示内稳性指数,x表示土壤资源的生态化学计量,y表示生物体(植物、微生物等)的生态化学计量,c为常数。对上式进行转化,得到ln y与ln x之间的线性关系式:

$$\ln y = 1/H \ln x + \ln c$$

式中:1/H为回归斜率,当回归关系不显著或1/H≤0时,则表示严格内稳态型关系,如果回归关系显著,0<1/H<0.25表示稳态型关系,0.25<1/H<0.50表示弱稳态型关系,0.50<1/H<0.75表示弱敏感型关系,1/H>0.75则表示敏感型关系。

1.6 数据处理与分析

用Microsoft Office 2019 Excel软件进行数据整理,采用SPSS Statistics 22软件进行单因素方差分析,采用Duncan's新复极差法进行多重比较,采用Spearman等级相关法进行指标间的相关性分析,根际与非根际的组间差异显著性采用配对样本Tukey检验法检验,线性拟合及图形绘制均在Origin 2023pro软件中完成。

2 结果与分析

2.1 土壤C、N、P及生态化学计量比

土壤C、N、P含量在整个生育期变化幅度较小,根际和非根际土壤有机碳含量分别为10.75~14.59 g·kg⁻¹和11.79~15.02 g·kg⁻¹,根际土壤有机碳含量在生育初期最高,此后呈持续下降趋势,而非根际土壤有机碳含量相对稳定。土壤全氮含量处在相对稳定的水平,仅在不同覆盖处理下存在明显差异性。土壤全磷含量变化在根际与非根际土壤中存在较强的一致性,非根际土壤全磷含量则更为稳定(图2)。

土壤C:N在整个生育期内变化幅度较小,根际土壤C:N维持在14.26~17.64,平均比值为15.77,非根际土壤C:N维持在14.29~18.91,平均比值为15.49;不同生育时期各处理下根际与非根际土壤C:P较为接近,全生育期内根际土壤C:P为35.15~45.49,平均比值为40.16,非根际土壤C:P为36.26~46.18,平均比值为41.58;整个生育期内,根际与非根际土壤N:P分别为2.26~2.82和2.17~3.14,平均比值分别为2.55和2.70,根际土壤N:P略低于非根际土壤(表2)。

为直观地观察甘薯田土壤养分的限制元素,引入三元图进行分析比较。对不同处理下整个生育期内的所有土壤样品以及参照点的C:N:P摩尔比进行归一化处理,3个坐标轴分别代表碳、氮、磷元素的相对占比(图3)。根际与非根际土壤呈相似规律,与三元图中的参照点和参照线相比,试验中所测得的样品比例倾向于磷素比重多,而碳和氮素比重少的一面,结果说明甘薯田土壤存在C、N共同限制,由于N:P总体水平高于平均值,因此土

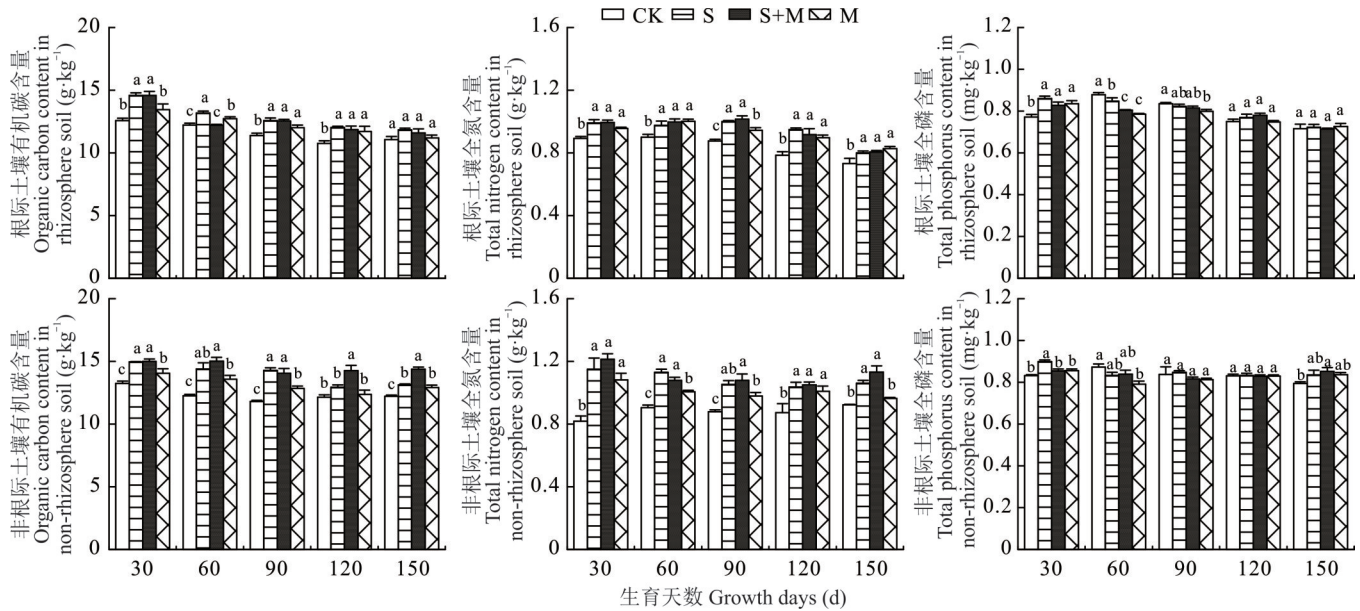


图2 土壤有机碳、全氮和全磷含量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus content

不同小写字母表示同一时期的不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,CK为无覆盖,S为秸秆覆盖,S+M为秸秆+紫云英覆盖,M为紫云英覆盖,下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same period at the $P < 0.05$ level. CK is no mulching, S is straw mulching, S+M is straw and milk vetch mulching, M is milk vetch mulching, the same below.

壤N限制性更强。图中箭头方向表示限制作用加深,覆盖处理下与无覆盖处理间的样点有明显分离,这表明生物覆盖措施可以有效缓解养分限制。

2.2 微生物C、N、P及生态化学计量比

根际土壤与非根际土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)含量在整个生育期内呈“先降低后升高再降低”的变化趋势,不同之处在于根际MBC含量90 d后其变化较为平缓。土壤微生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)含量在整个生育期内整体呈“先降低后升高再降低”的趋势,非根际土区略滞后于根际土区,二者微生物量氮含量峰值均出现在30 d,谷值均出现在60 d。根际土区中,土壤微生物量磷(microbial biomass phosphorus, MBP)30~90 d呈下降趋势,90 d后变化较小,而非根际土区土壤MBP则呈“先升高后降低再升高”的变化趋势(图4)。

根际土壤中,MBC:MBN、MBC:MBP和MBN:MBP为5.85~10.20、14.73~96.41和2.13~12.54。图5为土壤微生物量化学计量比的变化,图中红色虚线是全球范围内微生物化学计量比的平均水平。从整个生育期来看,参与测定的土壤样品点MBC:MBN大部分处于参照线的左侧,这说明微生物生长过程中受到的C限制大于N限制。同理,根据土壤样点的MBC:MCP、MBN:MBP与参照线的关系,可以得到根际土壤微生物在生长过程中的养分限制规律为C限制>N限制>P限制,这种趋势在60 d时表现最为明显。与根际土区相比,非根际土壤微生物量计量比的变化幅度较大,MBC:MBN、MBC:MBP、MBN:MBP为4.47~26.49、12.80~100.92、0.59~20.58。在30 d时微生物生长主要受C、P限制,60 d时,N限制>C限制>P限制,120 d之后,主要表现为C限制>N限制>P限制。

2.3 微生物量化学计量比内稳性特征

对MBC:MBN的内稳性特征分析结果显示(图6),在根际土区,S处理下的 $\ln(C:N_M)$ 与 $\ln(C:N_S)$ 具有显著相关性,但内稳性指数 $1/H < 0$,其他处理下的 $\ln(C:N_M)$ 与 $\ln(C:N_S)$ 无显著相关关系;在非根际土区,不同处理的 $\ln(C:N_M)$ 与 $\ln(C:N_S)$ 均无显著相关性,说明MBC:MBN与土壤之间是严格的稳态型关系。对MBC:MBP的内稳性特征分析结果显示(图7),根际与非根际土壤的 $\ln(C:P_M)$ 与 $\ln(C:P_S)$ 均出现显著相关性,但内稳性指数 $1/H < 0$,故MBC:MBP与土壤C:P之间保持严格内稳态。对MBN:MBP的内稳性特征分析结果显示(图8),在

表 2 土壤 C:N、C:P 和 N:P 的变化

Table 2 Changes in C:N, C:P and N:P in soil

计量比 Stoichiometric ratio	土区 Soil area	处理 Treatment	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d
C:N	根际 Rhizosphere	CK	16.43±0.18a	15.83±0.43a	15.15±0.11a	15.98±0.14a	17.64±0.38a
		S	17.17±0.37a	15.79±0.56a	14.68±0.15a	14.80±0.28a	17.26±0.20a
		S+M	17.11±0.19a	14.26±0.18b	14.41±0.30a	15.11±0.50a	16.77±0.37ab
		M	16.40±0.62a	14.80±0.33ab	14.85±0.42a	15.20±0.42a	15.78±0.55b
	非根际 Non-rhizosphere	CK	18.91±0.67a	15.80±0.39a	15.64±0.32a	16.34±0.92a	15.43±0.18a
		S	15.26±0.93b	14.86±0.75a	15.83±0.31a	14.57±0.61a	14.42±0.26a
		S+M	14.43±0.47b	16.24±0.58a	15.23±0.68a	15.85±0.51a	14.85±0.66a
		M	15.22±1.03b	15.73±0.46a	15.30±0.60a	14.29±0.26a	15.62±0.31a
C:P	根际 Rhizosphere	CK	42.03±0.41ab	35.82±0.72c	35.15±0.62b	36.94±0.64a	39.85±0.52a
		S	43.72±1.11ab	40.12±1.12ab	39.44±0.61a	40.38±1.05a	42.30±1.23a
		S+M	45.49±1.84a	39.06±0.34b	39.68±0.70a	39.19±0.97a	41.87±1.25a
		M	41.47±0.71b	41.77±0.69a	38.82±1.13a	40.32±1.38a	39.77±1.45a
	非根际 Non-rhizosphere	CK	41.01±0.74b	36.26±0.96b	36.37±1.26c	37.65±0.73b	39.65±0.16b
		S	42.90±0.43ab	44.49±0.79a	43.46±0.57ab	40.01±1.05b	40.57±1.22ab
		S+M	45.25±0.58a	46.18±0.67a	44.41±1.35a	44.41±1.46a	43.55±1.44a
		M	42.34±1.54ab	44.25±0.83a	40.70±0.89b	38.44±0.80b	39.81±1.02b
N:P	根际 Rhizosphere	CK	2.56±0.01a	2.27±0.06c	2.32±0.04b	2.31±0.06b	2.26±0.04b
		S	2.55±0.08a	2.54±0.08b	2.69±0.03a	2.73±0.06a	2.45±0.07a
		S+M	2.66±0.08a	2.74±0.06ab	2.76±0.09a	2.60±0.08a	2.50±0.04a
		M	2.53±0.06a	2.82±0.04a	2.61±0.04a	2.65±0.06a	2.52±0.01a
	非根际 Non-rhizosphere	CK	2.17±0.08b	2.30±0.05b	2.33±0.10c	2.32±0.17b	2.57±0.03b
		S	2.83±0.16a	3.00±0.10a	2.75±0.04ab	2.75±0.04a	2.82±0.12a
		S+M	3.14±0.06a	2.85±0.10a	2.92±0.08a	2.80±0.03a	2.94±0.08a
		M	2.79±0.08a	2.82±0.07a	2.66±0.05b	2.69±0.07a	2.55±0.02b

注：表中数据为平均值±标准误差。不同小写字母表示同一土区不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: The data in the Table are showed as mean value±standard error. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same soil area at the $P < 0.05$ level.

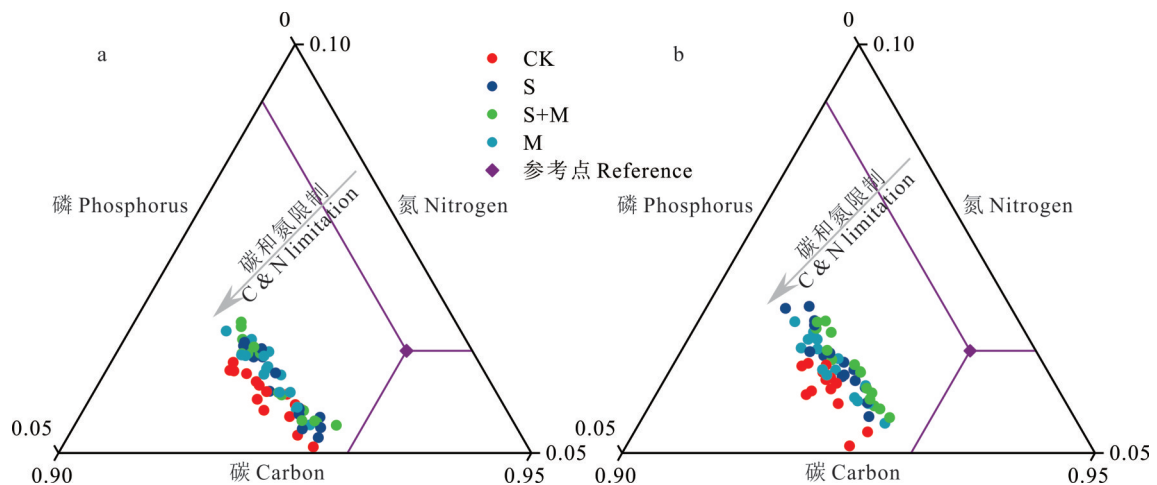


图 3 土壤碳、氮、磷含量的三元图

Fig. 3 Ternary diagram of C, N and P content in the soil

图中紫色参考点与紫色参照线参考 Tian 等^[19]的研究结果,图中箭头方向表示 C 限制和 N 限制作用增强, a、b 分别表示根际与非根际土区。The purple reference point and purple reference line referred to the results of Tian, *et al*^[19], and the arrow direction indicates the enhancement of C restriction and N restriction, a and b represent rhizosphere and non-rhizosphere soil areas respectively.

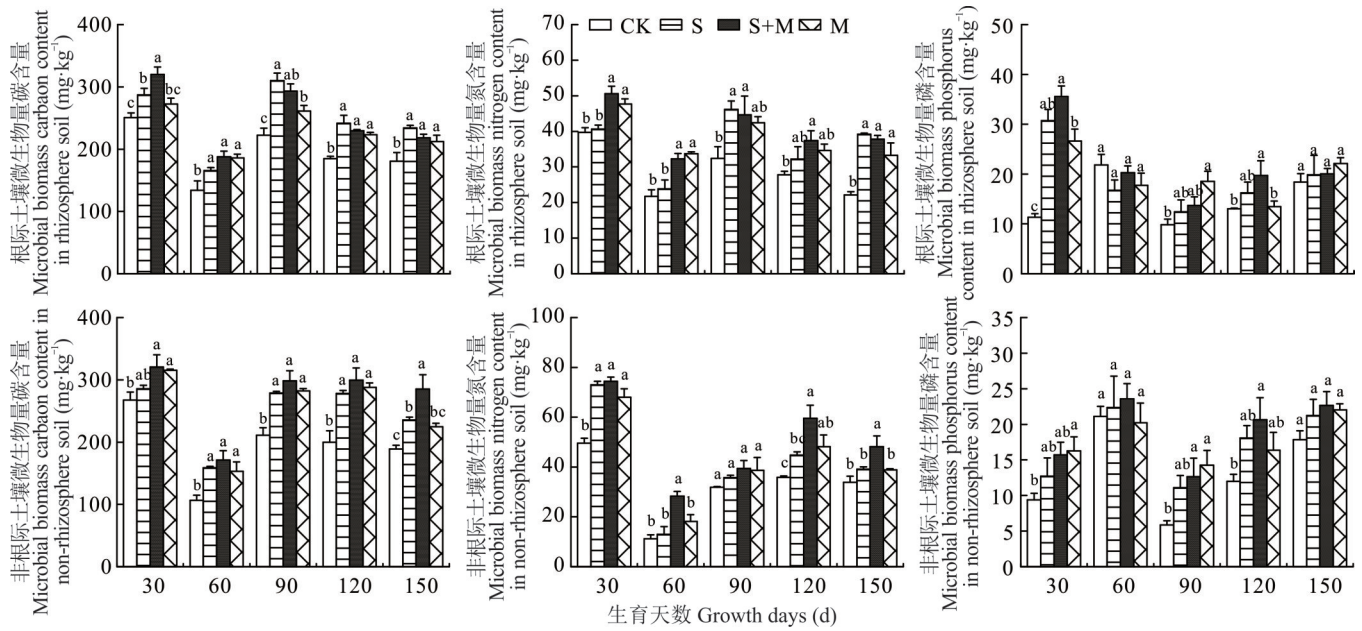


图4 土壤微生物量碳、微生物量氮和微生物量磷含量的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of soil microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN) and microbial biomass phosphorus (MBP) content

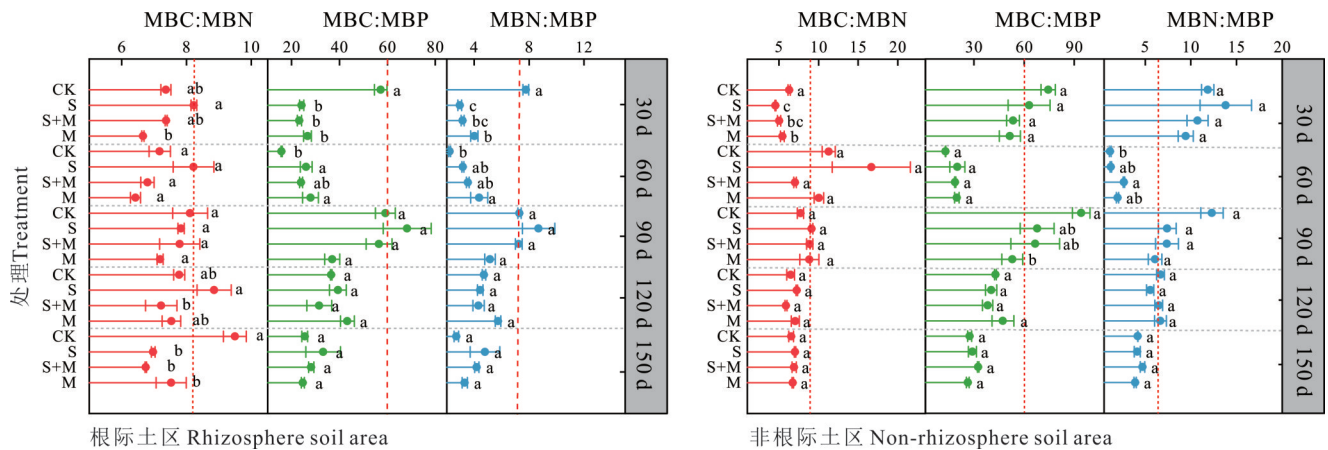


图5 根际土壤和非根际土壤微生物量化学计量比的变化

Fig. 5 Changes of microbial biomass stoichiometric ratio in rhizosphere and non-rhizosphere soil

图中红色虚线表示微生物量化学计量比的参考值 $60:7:1^{[20]}$,MBC:MBN、MBC:MBP和MBN:MBP分别表示微生物量碳与微生物量氮、微生物量碳与微生物量磷和微生物量氮与微生物量磷的化学计量比。In the figure, the red dotted line represents the reference of microbial biomass stoichiometric ratio $60:7:1^{[20]}$. MBC:MBN, MBC:MBP and MBN:MBP represent the stoichiometric ratios of microbial biomass carbon with microbial biomass nitrogen, microbial biomass carbon with microbial biomass phosphorus and microbial biomass nitrogen with microbial biomass phosphorus, respectively.

根际土区,对S+M、S、M处理下及所有参试土样进行的相关拟合中, $\ln(N:P_M)$ 与 $\ln(N:P_S)$ 均无显著相关关系,MBN:MBP与土壤N:P之间呈严格稳态型关系,但CK处理下的 $\ln(N:P_M)$ 与 $\ln(N:P_S)$ 表现显著正相关关系($P=0.0237, R^2=0.5790$),其内稳性指数 $1/H>0.75$,这表明CK处理下的MBN:MBP与土壤N:P之间是敏感态关系。而对于非根际土区,各拟合关系中均未出现显著相关性。

2.4 甘薯植株C、N、P含量、产量及生态化学计量比

图9是甘薯各器官元素含量。甘薯植株各器官的碳含量在生长发育过程中的变化较小,根的碳含量为 $367.90\sim 426.53\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,茎的碳含量为 $352.39\sim 413.24\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,叶的碳含量为 $373.12\sim 429.80\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,叶柄的碳含量为 $317.21\sim 380.57\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在甘薯150 d的生长发育过程中,其根氮含量与叶氮含量变化趋势一致,均呈先降低后升高的趋势,而甘薯茎氮含量则与叶柄氮含量变化相似,表现为先降低后升高再降低的规律。甘薯根和

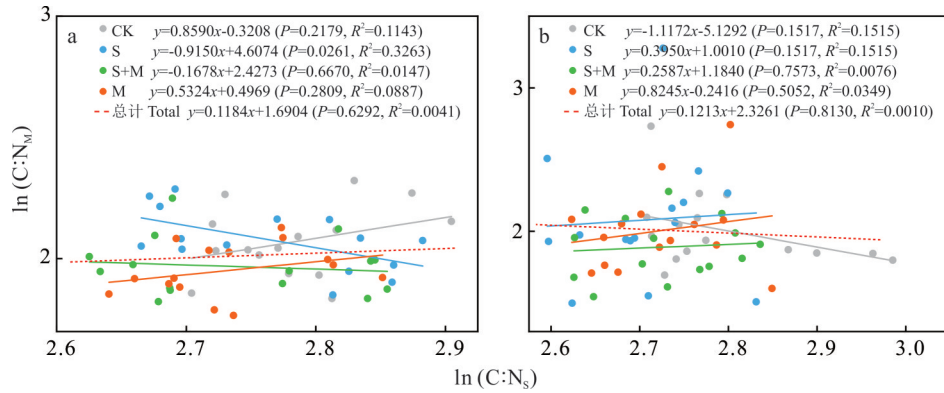


图 6 微生物量碳:微生物量氮和土壤 C:N 的线性拟合

Fig. 6 Linear fit of microbial biomass carbon:microbial biomass nitrogen (MBC:MBN) and soil C:N

图中 a 为根际土区, b 为非根际土区, 横坐标为土壤化学计量比的自然对数值, 纵坐标为土壤微生物化学计量比的自然对数值, 下同。In the figure, a is the rhizosphere soil area, b is the non-rhizosphere soil area, and the horizontal coordinate is the natural logarithm of the stoichiometric ratio of soil, and the vertical coordinate is the natural logarithm of the stoichiometric ratio of soil microbial quantification, the same below.

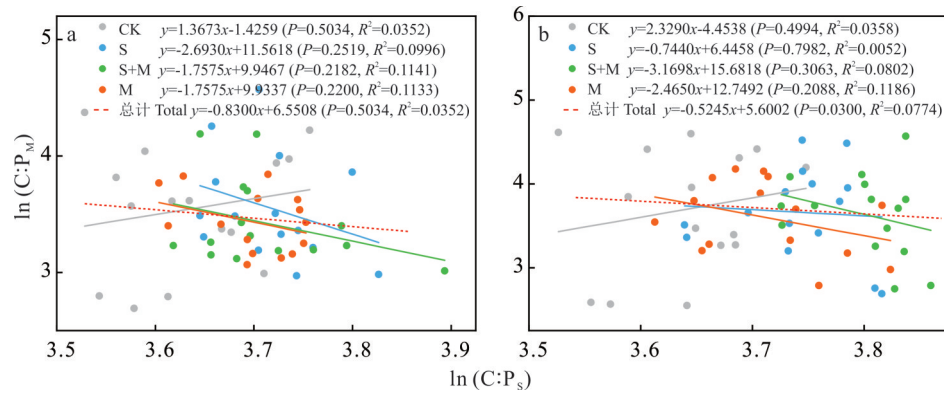


图 7 微生物量碳:微生物量磷和土壤 C:P 的线性拟合

Fig. 7 Linear fit of microbial biomass carbon:microbial biomass phosphorus (MBC:MBP) and soil C:P

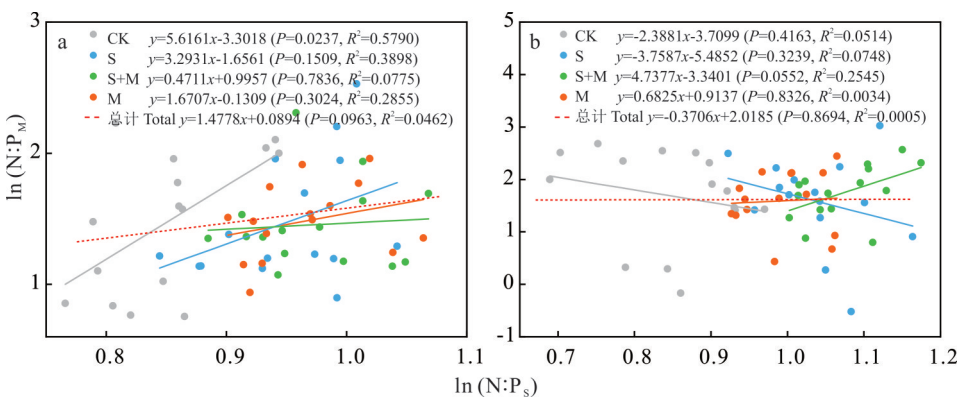


图 8 微生物量氮:微生物量磷和土壤 N:P 的线性拟合

Fig. 8 Linear fit of microbial biomass nitrogen:microbial biomass phosphorus (MBN:MBP) and soil N:P

叶中的磷含量变化与氮含量一致, 在整个生育期内呈先降低后升高的趋势, 甘薯茎和叶柄中的磷含量走势相同, 整个生育期内表现为持续下降的规律。

图 10 所示为各处理下甘薯的产量, S+M、S、M、CK 处理的甘薯产量分别为 22267.92、18969.58、18464.58 和 16552.92 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, S+M、S、M 处理的甘薯产量较 CK 处理分别提高了 34.53%、14.60% 和 11.55%。表明秸秆与紫云英覆盖可以显著提升甘薯产量。

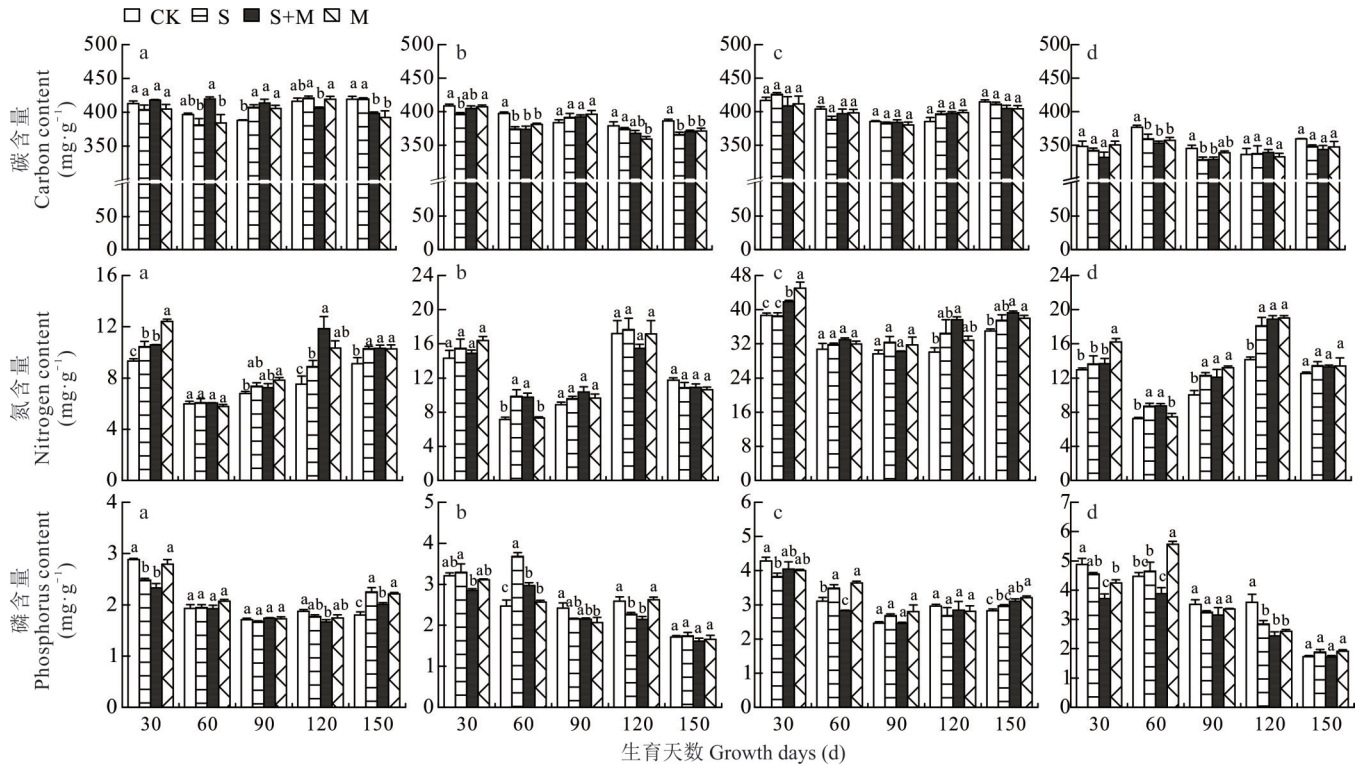


图9 甘薯植株碳、氮和磷含量的变化

Fig. 9 Changes of C, N and P content in sweet potato plants

a, b, c, d 分别表示甘薯根、茎、叶、叶柄。In the figure, a, b, c, and d represent sweet potato root, stem, leaf, and petiole, respectively.

图 11 显示甘薯整个生育期内化学计量比特征。整个生育期内甘薯各器官之间的 C:N 存在差异,不同覆盖处理影响甘薯 C:N 的变化。各器官 C:N 表现为根>茎>叶柄>叶,甘薯根和茎的 C:N 在整个生育期内变异相对较大,叶柄次之,叶最小,说明甘薯叶 C:N 在应对外在环境变化时具有更强的抵抗能力。对不同处理进行分析,CK 处理的 C:N 在各器官中均有较高值,在甘薯叶中,CK 处理显著高于 S+M 处理。整个生育期内甘薯各器官 C:P 总体表现为根>茎>叶>叶柄,根、茎及叶柄的 C:P 在甘薯生长发育过程中变异较大,相比之下叶表现则较为稳定。整个生育期内,甘薯根、茎和叶柄 N:P 处于较低水平。就不同处理而言,甘薯根、茎、叶及叶柄的 N:P 总体表现为 S+M>M>S>CK。

2.5 甘薯植株化学计量比内稳性特征

对 C:N 的内稳性特征分析结果显示(图 12),甘薯根和叶的 $\ln(C:N_p)$ 与根际土壤 $\ln(C:N_s)$ 之间有显著相关性,但其内稳性指数 $1/H < 0$,其次甘薯茎和叶柄的 $\ln(C:N_p)$ 与根际土壤 $\ln(C:N_s)$ 之间没有显著相关性;而甘薯各器官的 C:N 与非根际土壤 C:N 之间不存在显著线性关系,表明甘薯各器官的 C:N 与土壤 C:N 之间均呈严格稳态型关系。对 C:P 的分析结果显示(图 13),甘薯根和叶的 $\ln(C:P_p)$ 与根际土壤 $\ln(C:P_s)$ 之间显著相关,但其内稳性指数 $1/H < 0$,其余部位均未呈现显著性;对于非根际土区并未形成显著相关关系,这表明甘薯植株的 C:P 与土壤 C:P 之间呈严格稳态型关系。对 N:P 分析结果显示(图 14),甘薯各器官 $\ln(N:P_p)$ 与根际和非根际土壤 $\ln(N:P_s)$ 均无显著相关性,表明甘薯植株 N:P 与土壤之间也是严格稳态型关系。

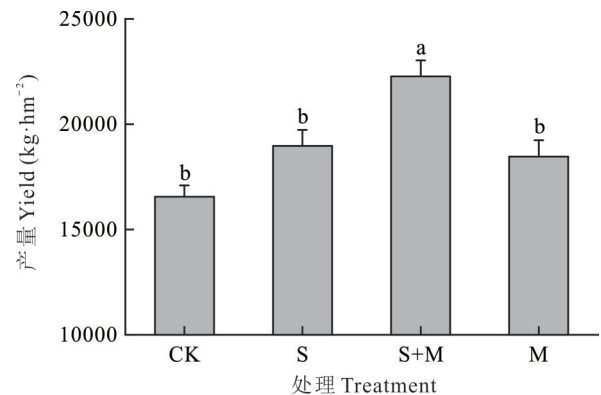


图 10 甘薯产量

Fig. 10 Yield of sweet potato

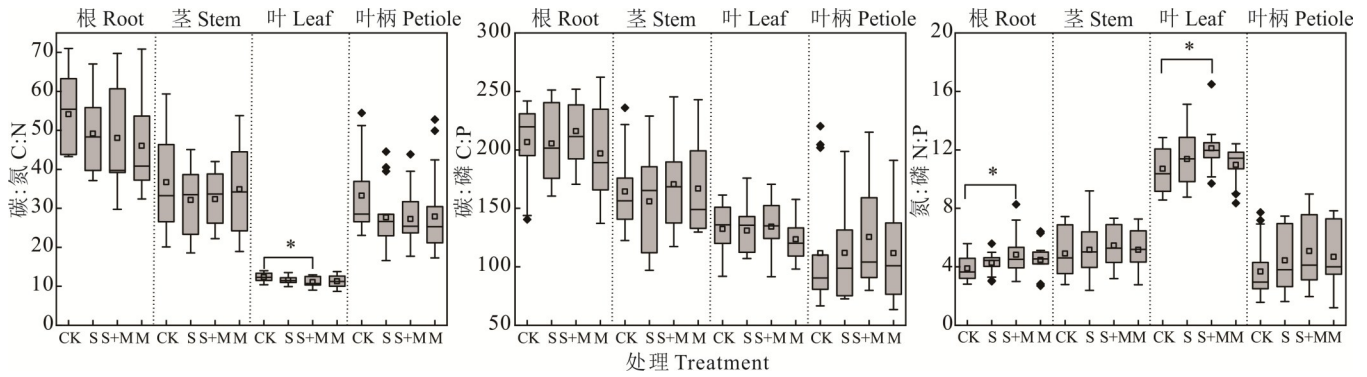


图 11 全生育期内甘薯各器官碳:氮(C:N)、碳:磷(C:P)和氮:磷(N:P)

Fig. 11 C:N, C:P and N:P of various organs of sweet potato during the whole growth period

图中箱体上下底分别表示数据的上四分位数和下四分位数,实线和方框分别表示数据的中位数和平均数, $n=15$;"*"表示处理之间差异显著($P<0.05$)。In the figure, the top and bottom of the box-plot represent the upper and lower quartile of the data, respectively; The solid line and the box represent the median and average of the data, respectively, $n=15$; "*" indicates significant difference among treatments ($P<0.05$).

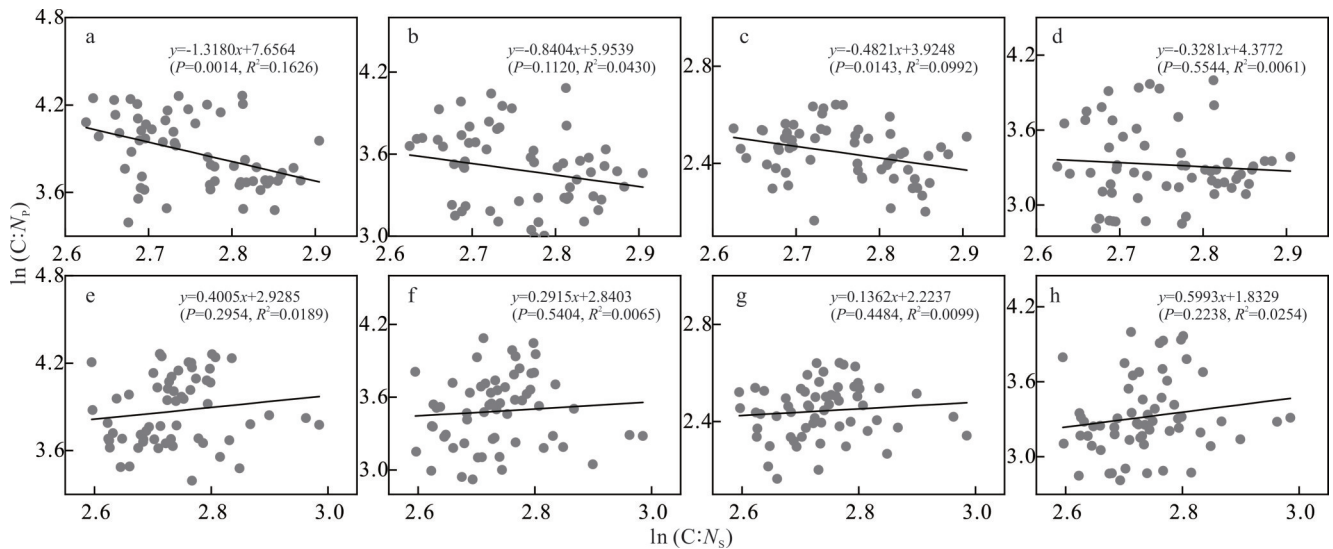


图 12 甘薯各器官 C:N 与土壤 C:N 的线性拟合

Fig. 12 Linear fit of sweet potato organs C:N and soil C:N

图中 a、b、c、d 分别为甘薯根、茎、叶、叶柄与根际土壤之间的线性回归方程,e、f、g、h 分别为甘薯根、茎、叶、叶柄与非根际土壤之间的线性回归方程,横坐标为土壤化学计量比的自然对数值,纵坐标为植株各器官化学计量比的自然对数值,下同。In the figure, a, b, c and d represent the linear regression equation between sweet potato roots, stems, leaves and petioles with rhizosphere soil, e, f, g and h represent the linear regression equation between sweet potato roots, stems, leaves and petioles with non-rhizosphere. The horizontal coordinate is the natural logarithm of the stoichiometric ratio of soil, and the vertical coordinate is the natural logarithm of the stoichiometric ratio of plant organs. The same below.

3 讨论

3.1 秸秆和紫云英覆盖对土壤的影响

作物秸秆、残茬还田可以显著提高土壤有机碳、全氮、全磷含量^[19,21-22]。生物覆盖处理总体上提高了有机碳和全氮含量,前期土壤有机碳明显高于后期,是因为当秸秆作为外源有机物输入土壤时,有机质短期内周转加快形成激发效应^[23],由于根际土壤微生物活性较强,其激发效应也更为强烈。不同生育时期各处理对全磷含量的影响有所差别,中期无覆盖处理全磷要高于生物覆盖处理,这可能是由于甘薯生育中期遭遇持续高温与干旱,裸露地表会加速水分蒸腾,导致微生物活性降低,阻碍微生物的矿化作用和植物对小分子磷的吸收利用^[24]。此外,磷元素在土壤易发生淋溶作用,有研究表明有机物覆盖措施能有效降低农田土壤磷的淋溶损失,但在极端干旱的条件下,无覆盖处理下淋溶下沉的磷会更多地随着水分蒸腾向上迁移^[25]。

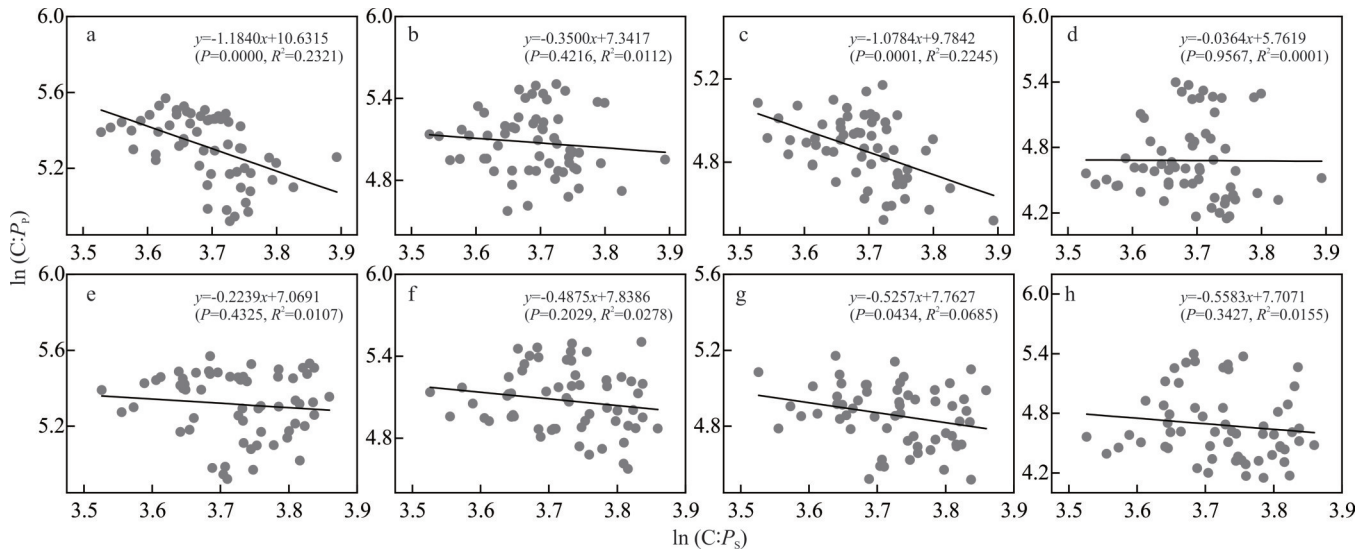


图 13 甘薯各器官 C:P 与土壤 C:P 的线性拟合

Fig. 13 Linear fit of sweet potato organs C:P and soil C:P

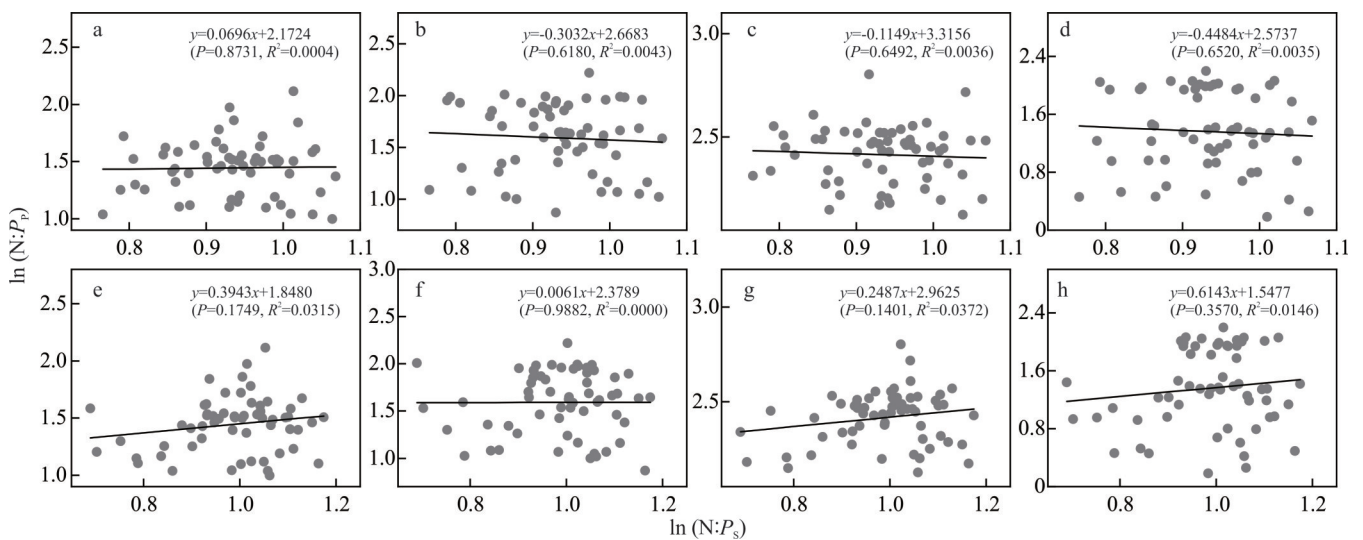


图 14 甘薯各器官 N:P 与土壤 N:P 的线性拟合

Fig. 14 Linear fit of sweet potato organs N:P and soil N:P

土壤 C:N 代表土壤有机质分解和矿化速率,二者成反比关系^[26]。本研究中根际土壤与非根际土壤 C:N 高于我国农田耕层土壤 C:N 的平均水平^[19],土壤受 N 限制大于 C 限制。一些研究表明,秸秆还田过程中会增加土壤的 C:N,造成碳源的生物固持现象^[27],本研究与其不同,可能是由于还田秸秆类型不同所致,甘薯生长前期覆盖的秸秆为蚕豆与紫云英,体内 C:N 相对较低,此外,蚕豆与紫云英通过根瘤菌固定大气中的 NO_2 ,从而增加土壤的氮素水平^[28]。土壤 C:P 指示着土壤磷素的矿化效率,表征土壤磷素的有效性^[29]。本研究中,全生育期内根际和非根际土壤 C:P 低于我国农田土壤 C:P 的平均值^[20],说明受 C 限制大于 P 限制。秸秆和紫云英覆盖处理均能显著提高根际与非根际土壤的 C:P,S+M 覆盖效果要优于单独覆盖处理,这表明外源秸秆及紫云英添加有利于碳、磷元素的平衡,在富磷状态下能够延缓磷的矿化速率,降低磷元素流失风险^[21]。土壤 N:P 是评估土壤养分限制性的重要指标^[30]。根际与非根际土壤 N:P 远低于我国农田土壤的平均水平^[20],说明受 N 限制远大于 P 限制。不同生物覆盖处理对土壤 N:P 的提高均有积极影响,其中秸秆加紫云英的覆盖处理效果明显更好。综合表明秸秆加紫云英覆盖能够提高土壤碳、氮、磷的含量,调节土壤 C:N,提高 C:P 和 N:P,使元素比例向更加稳定的平衡

关系转化,缓解由于比例失调造成的养分亏缺与养分限制。

3.2 秸秆和紫云英覆盖对土壤微生物及内稳性特征的影响

土壤微生物体内固定的碳、氮、磷元素是植物吸收利用的有效养分,土壤微生物量碳、氮、磷的含量也成为评价土壤肥力的重要指标^[31]。秸秆还田、绿肥还田均能显著提高土壤微生物量^[32]。本研究中,各生育时期的微生物量碳、氮、磷含量有所差异,其中微生物量碳、氮在60 d时含量处于最低水平,这可能是由于该生育时期的高温微雨所致。微生物量碳、氮、磷通常具有较为稳定的耦合关系,但本研究发现,60 d时的非根际土壤微生物量磷含量反而较高,90 d降到最低,这可能与干旱的时间长短有关,短期的增温会诱导微生物加快磷的矿化作用,干旱时间延长则会导致微生物量磷含量的大幅度降低^[33]。

微生物生态化学计量比可以反映微生物群体对养分的需求,土壤碳、氮、磷含量的变化将诱导微生物进行生存策略的调整,从而加速或降低对有机物的分解速率^[34]。前人对全球范围微生物计量比的研究得出一个相对稳定的比值为60:7:1^[20]。本研究中根际与非根际土壤的MBC:MBN、MBC:MBP、MBN:MBP值与平均水平较为接近,但由于农田土壤受耕作措施、施肥等因素的影响,比值的波动范围较大。总体上看,该地区土壤微生物受C限制>N限制>P限制。

微生物群体会随着土壤资源及环境的变化而变化,尽管如此,土壤微生物依然具有保持其体内元素化学计量比稳态的能力^[35]。研究结果显示,在土壤微生物和土壤的互馈关系中,微生物的MBC:MBN、MBC:MBP、MBN:MBP总体与土壤保持严格的内稳态关系,这表明在整个生育期内,即使土壤碳、氮、磷含量受耕作措施影响发生变化,但微生物计量比仍受到高度制约。对于不同处理下的内稳性分析表明,仅CK处理下的根际土壤微生物MBN:MNP与土壤之间呈敏感态关系,其余处理均为严格稳态型关系,这表明免耕条件下进行生物覆盖一定程度上有利于提高微生物生长的稳定性。

3.3 秸秆与紫云英覆盖对甘薯及内稳性特征的影响

彭亚敏等^[36]的研究显示,秸秆覆盖处理能够显著提高小麦(*Triticum aestivum*)籽粒、叶片及秸秆的碳、氮、磷含量。本研究中甘薯各器官氮含量的结果与之相似,而覆盖处理并未显著提高甘薯茎、叶和叶柄的碳含量,并且在生育后期有明显降低。有研究表明,甘薯根、茎、叶柄相比于叶对其环境变化的响应阈值较低,为维持叶的性状功能要先满足叶片的元素需求,根、茎和叶柄首先向叶运输养分^[37],故导致生育后期甘薯根、茎、叶柄的碳含量明显降低。在生育前期S处理下甘薯根和叶的磷含量要低于CK处理,这是因为前期秸秆的大量投入会造成微生物对磷元素的固定增强,与绿肥相比作物秸秆富含难分解纤维素、木质素等,腐解需更长时间,从而造成磷素的滞后释放。从成熟期的结果来看,秸秆及紫云英覆盖均能提高甘薯根和叶的磷含量,但对于甘薯茎和叶柄无显著影响,这可能是因为植物在不同生育时期采取的养分分配策略不同^[38],处于成熟期的甘薯茎和叶柄主要用于养分的运输而非储存养分。众多研究表明,覆盖还田处理能够显著增加作物产量^[25,27],本试验中,与无覆盖处理相比,秸秆与紫云英覆盖显著增加甘薯的产量,并以秸秆与紫云英协同覆盖处理效果最佳。

植物组织的C:N和C:P用于表示植物的碳同化能力。同等情况下,比值越高代表植物利用氮、磷养分同化的碳水化合物越少^[39]。本研究中,整个生育期内甘薯根的C:N和C:P均大幅低于甘薯其他器官。与CK相比,S+M处理显著降低了甘薯叶片在整个生育期内的C:N,说明覆盖处理可以通过调节土壤养分状况来优化甘薯对养分的吸收利用效率,延缓器官衰老速率,积累更多的同化产物。甘薯在整个生育前期无覆盖处理的C:P较低,而后期生物覆盖处理下的C:P要低于无覆盖处理,这说明不同覆盖处理下甘薯在不同生育阶段采取不同的生存策略,通过自身生理生态的调节作用以应对外界环境的复合影响^[40]。植物N:P指示着植物群落或组织器官在生长过程的养分限制状况。根据N:P阈值假说^[41],本试验中甘薯整个生育期内各器官N:P均小于14,说明试验区甘薯生长过程中主要受到N限制,且在根部表现更为强烈。而覆盖处理下的甘薯各器官N:P均有所提高,发现两者协同覆盖产生的叠加效果可以有效地缓解甘薯生长过程中的N限制问题。

化学计量内稳性理论认为,生物体在面对环境变化时,会启动自身生理生态调节作用而确保生物体元素组成的相对稳定^[10]。内稳性的强弱反映了生物体在长期的进化过程中适应环境改变的能力^[42],一般来说,生态系统内

稳性越强,具有更高的稳定性和生产力。王春燕等^[43]研究表明,越容易受到外界干扰的生态系统其植物的内稳性越弱。农田是陆地生态系统中受人为干扰程度最大的系统^[44],采取合理的田间管理措施以提高农田生态系统的稳定性具有重要意义。本研究结果显示,甘薯生长过程中各器官化学计量比对根际与非根际土壤化学计量比之间均呈严格的内稳态关系。甘薯的强内稳性表明其在耐受土壤贫瘠以及适应环境胁迫上具有明显优越性,以维持更稳定的生长发育,从而提高农田生态系统的稳定性和生产能力。

4 结论

作物与土壤和微生物中C、N、P元素以及化学计量比之间关系密切,并且呈现出严格的内稳态关系。相较于表无覆盖处理,秸秆与紫云英覆盖可以更好地调节作物的养分吸收,提高甘薯产量,提高土壤肥力,缓解养分限制。其中,以作物秸秆与紫云英协同覆盖作用效果最为显著。该处理对于维持土壤、微生物和作物碳氮磷化学计量平衡,缓解养分限制具有重要作用。

参考文献 References:

- [1] Wang L C. Theory and practice of sustainable agricultural development. Beijing: Science Press, 2015: 273—275.
王龙昌. 农业可持续发展理论与实践. 北京: 科学出版社, 2015: 273—275.
- [2] Gao Y H, Qu X M, Liang Y T, *et al.* Study on organic carbon pool of topsoil in farmland in a typical area of southwestern Chongqing. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 36(5): 120—126.
高岩红, 瞿雪梅, 梁颖涛, 等. 渝西南典型区农田表层土壤有机碳库研究. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(5): 120—126.
- [3] Du W P, Yan H M, Zhen L, *et al.* The experience and practice of desertification control in karst region of southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5798—5808.
杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 等. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究. *生态学报*, 2019, 39(16): 5798—5808.
- [4] Choudhury B U, Nengzouzam G, Islam A. Runoff and soil erosion in the integrated farming systems based on micro-watersheds under projected climate change scenarios and adaptation strategies in the eastern Himalayan mountain ecosystem (India). *Journal of Environmental Management*, 2022, 309: 114667.
- [5] Kader M A, Senge M, Mojid M A, *et al.* Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168: 155—166.
- [6] Dai Y S, Cheng X, Liu B Y, *et al.* Impacts of synergistic mulching of straw and milk vetch on soil nutrients, enzyme activities and wheat yield in upland of southwest China. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(6): 1339—1347.
戴伊莎, 成欣, 刘帮艳, 等. 秸秆和紫云英协同覆盖对西南旱地土壤养分, 酶活性及小麦产量的影响. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1339—1347.
- [7] Zhang Z S, Cao C G, Guo L J, *et al.* The effects of rape residue mulching on net global warming potential and greenhouse gas intensity from no-tillage paddy fields. *The Scientific World Journal*, 2014(1): 198231.
- [8] Sarkar S, Skalicky M, Hossain A, *et al.* Management of crop residues for improving input use efficiency and agricultural sustainability. *Sustainability*, 2020, 12(23): 9808.
- [9] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540—550.
- [10] Sterner R W, Elser J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [11] Zeng D P, Jiang L L, Zeng C S, *et al.* Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5484—5492.
曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. *生态学报*, 2013, 33(18): 5484—5492.
- [12] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis (Third Edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837—842.
- [14] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and*

- Biochemistry, 1987, 19(6): 703–707.
- [15] Wu J S, Xiao H A, Chen G Q, *et al.* Measurement of microbial biomass—P in upland soils in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 70–78.
吴金水, 肖和艾, 陈桂秋, 等. 旱地土壤微生物磷测定方法研究. *土壤学报*, 2003, 40(1): 70–78.
- [16] Lu R K. *Soil agrochemical analysis methods*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [17] Makino W, Cotner J B, Sterner R W, *et al.* Are bacteria more like plants or animals? Growth rate and resource dependence of bacterial C:N:P stoichiometry. *Functional Ecology*, 2003, 17(1): 121–130.
- [18] Persson J, Fink P, Goto A, *et al.* To be or not to be what you eat: regulation of stoichiometric homeostasis among autotrophs and heterotrophs. *Oikos*, 2010, 119(5): 741–751.
- [19] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98: 139–151.
- [20] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235–252.
- [21] Pan L D, Li R, Zhang Y S, *et al.* Effects of straw mulching on soil ecological stoichiometry characteristics and yield on sloping farmland in karst area, Southwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11): 4428–4438.
盘礼东, 李瑞, 张玉珊, 等. 西南喀斯特区坡耕地秸秆覆盖对土壤生态化学计量特征及产量的影响. *生态学报*, 2022, 42(11): 4428–4438.
- [22] Wang K K, Ren T, Yan J Y, *et al.* Straw returning mediates soil microbial biomass carbon and phosphorus turnover to enhance soil phosphorus availability in a rice-oilseed rape rotation with different soil phosphorus levels. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 335: 107991.
- [23] Guenet B, Neill C, Bardoux G, *et al.* Is there a linear relationship between priming effect intensity and the amount of organic matter input? *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(3): 436–442.
- [24] Yang G, Li Z G, Shi B D. Spatial and temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and soil microbial biomass phosphorus in the burned area of *Larix gmelinii*. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 5027–5037.
杨光, 李兆国, 石炳东. 兴安落叶松林火烧迹地土壤有效磷与土壤微生物生物量磷时空演变特征. *生态学报*, 2023, 43(12): 5027–5037.
- [25] Liu X H, Gao X M, Yu M, *et al.* Effects of straw returning amount on soil phosphorus leaching and corn yield in dryland of northeast China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(10): 154–160.
刘晓辉, 高晓梅, 于淼, 等. 秸秆还田量对东北旱地土壤磷素淋溶及玉米产量的影响. *中国农业科技导报*, 2022, 24(10): 154–160.
- [26] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2013, 373: 553–568.
- [27] Wu P N, Wang Y L, Hou X Q, *et al.* Effects of straw returning with nitrogen fertilizer on maize yield and soil physical properties under drip-irrigation in Yanghuang irrigation area in Ningxia. *Soils*, 2020, 52(3): 470–475.
吴鹏年, 王艳丽, 侯贤清, 等. 秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区滴灌玉米产量及土壤物理性状的影响. *土壤*, 2020, 52(3): 470–475.
- [28] Xu W X, Li J Q, Meng L, *et al.* Effects of kudzu mulching on physical and chemical properties and enzyme activities of surface soil in young rubber plantation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1740–1748.
徐文娴, 李金秋, 孟磊, 等. 葛藤覆盖对幼龄橡胶园表层土壤理化性状和酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1740–1748.
- [29] Janssen B H. Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil*, 1996, 181: 39–45.
- [30] Zheng S M, Xia Y H, Hu Y J, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil: Effects of agricultural land use and climate at a continental scale. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104903.
- [31] Wu J. *Study on soil ecological stoichiometry under different soil management practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province*. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
武均. *不同管理措施下陇中黄土高原旱作农田土壤生态化学计量学特征研究*. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [32] Prommer J, Walker T W N, Wanek W, *et al.* Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon

- accumulation at higher plant diversity. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 669–681.
- [33] Peng S X, Chen D P, Wang J W, *et al.* Progress in phosphorus biogeochemical cycle under global changes. *Environmental Ecology*, 2020, 2(12): 1–7, 22.
彭淑娴, 陈登鹏, 王嘉伟, 等. 全球变化背景下磷生物地球化学循环研究进展. *环境生态学*, 2020, 2(12): 1–7, 22.
- [34] Malik A A, Martiny J B H, Brodie E L, *et al.* Defining trait-based microbial strategies with consequences for soil carbon cycling under climate change. *The ISME Journal*, 2020, 14(1): 1–9.
- [35] Yang Y, Liu H, Yang X, *et al.* Plant and soil elemental C:N:P ratios are linked to soil microbial diversity during grassland restoration on the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(1): 150557.
- [36] Peng Y M, Wu J, Cai L Q, *et al.* Effects of no-tillage and straw mulching on carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry in spring wheat and soil. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 1062–1072.
彭亚敏, 武均, 蔡立群, 等. 免耕及秸秆覆盖对春小麦—土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1062–1072.
- [37] Tang Z Y, Xu W T, Zhou G Y, *et al.* Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4033–4038.
- [38] Lambers H, Raven J A, Shaver G R, *et al.* Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(2): 95–103.
- [39] Lin S Y, Zeng Y, Yang W W, *et al.* Effects of straw and biochar addition on carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry in *Jasminum sambac* plant and soil. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(4): 530–545.
林少颖, 曾瑜, 杨文文, 等. 添加秸秆及其生物炭对茉莉植株与土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. *植物生态学报*, 2023, 47(4): 530–545.
- [40] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243–266.
- [41] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441–1450.
- [42] Yu Y F, He T G, Zeng C C, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in plants, litter, soil, and microbes in degraded vegetation communities in a karst area of southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 935–946.
俞月凤, 何铁光, 曾成城, 等. 喀斯特区不同退化程度植被群落植物—凋落物—土壤—微生物生态化学计量特征. *生态学报*, 2022, 42(3): 935–946.
- [43] Wang C Y, Yang C, Song C G, *et al.* Root-soil ecological stoichiometric characteristics of alpine grassland in the source area of Three Rivers. *Grassland and Turf*, 2022, 42(5): 8–20.
王春燕, 杨冲, 宋成刚, 等. 三江源区高寒草地根系—土壤C、N、P生态化学计量特征. *草原与草坪*, 2022, 42(5): 8–20.
- [44] Li S J, Sheng M J, Li G, *et al.* Variations in eco-enzymatic stoichiometric characteristics of fluvo-aquic soil with different use intensities in the north China plain. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(12): 2733–2741.
李胜君, 盛美君, 李刚, 等. 华北不同利用强度潮土酶生态化学计量特征比较. *农业环境科学学报*, 2022, 41(12): 2733–2741.