

DOI: 10.5846/stxb202104030867

盘礼东,李瑞,张玉珊,黎庆贵,高家勇,袁江.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.

Pan L D, Li R, Zhang Y S, Li Q G, Gao J Y, Yuan J. 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.

## 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

盘礼东<sup>1,2</sup>, 李 瑞<sup>1,2,\*</sup>, 张玉珊<sup>1,2</sup>, 黎庆贵<sup>1,2</sup>, 高家勇<sup>1,2</sup>, 袁 江<sup>1,2</sup>

1 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001

2 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001

**摘要:** 土壤养分亏缺是限制作物生长的关键因素, 同时也是制约作物产量的重要影响因子。为提高西南喀斯特区坡耕地土壤肥力和作物产量, 于 2018—2019 年连续两年在贵州省黔西县开展了野外原位径流小区观测试验。通过该试验探讨不同秸秆覆盖率下土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)含量及其生态化学计量特征, 揭示不同秸秆覆盖率下土壤养分状况及土壤改良效果。共设 6 个秸秆覆盖梯度, 玉米单作+秸秆覆盖(SM<sub>0</sub>—SM<sub>5</sub>, 0, 1111, 2222, 3889, 5556, 6944 kg/hm<sup>2</sup>), 其中 SM<sub>0</sub> 为对照组(CK)。结果表明: (1) 秸秆覆盖不同程度增加了土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)及全磷(TP)含量, 总体上随覆盖量的增加而增加, 尤其是覆盖量较多的情况下(SM<sub>4</sub>, SM<sub>5</sub>), 均显著高于对照( $P < 0.05$ ), 但两者之间差异不显著( $P > 0.05$ ), 而全钾(TK)则随着覆盖量的增加而减少。(2) 在高秸秆覆盖条件下(SM<sub>4</sub>, SM<sub>5</sub>), 除了 N:P 外, 两年各土壤养分元素的化学计量比均显著高于对照( $P < 0.05$ ), 但 SM<sub>4</sub> 和 SM<sub>5</sub> 之间差异不显著( $P > 0.05$ )。 (3) 秸秆覆盖条件下土壤 C:N、C:P 较低, 加速了土壤有机质矿化分解, 同时也说明 P 的有效性较高。(4) 高秸秆覆盖条件下对作物增产较为显著, 其中 SM<sub>4</sub> 处理作物产量最高。研究表明覆盖于地表的秸秆作为土壤营养元素的重要来源, 可将其作为一种补充手段以补给土壤中被作物吸收和随水土流失而流失的土壤养分。综合主成分、灰色关联度及差异显著性分析, 同时结合作物产量, 建议在西南喀斯特坡耕地覆盖 6000 kg/hm<sup>2</sup> 左右的秸秆以促进农田生态系统的恢复, 从而达到较好的土壤增肥、作物增产效果。

**关键词:** 秸秆覆盖; 坡耕地; 土壤养分; 生态化学计量学; 产量; 西南喀斯特区

## Effects of straw mulching on soil ecological stoichiometry characteristics and yield on sloping farmland in karst area, Southwestern China

PAN Lidong<sup>1,2</sup>, LI Rui<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Yushan<sup>1,2</sup>, LI Qinggui<sup>1,2</sup>, GAO Jiayong<sup>1,2</sup>, YUAN Jiang<sup>1,2</sup>

1 School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2 State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China

**Abstract:** Soil nutrient deficiency is a key factor limiting crop growth and yield, but also threatens the survival of crops. In order to improve soil fertility and crop yield of sloping farmland in karst area of Southwestern China, the experiments were carried out in Qianxi county, Guizhou province for two consecutive years from 2018 to 2019. We explored the contents and the ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus, potassium and revealed the soil nutrient status and soil improvement effect under different straw mulching application rates through this experiment. There were six straw mulching gradients of maize monoculture+straw mulching (SM<sub>0</sub>—SM<sub>5</sub>, 0, 1111, 2222, 3889, 5556, 6944 kg/hm<sup>2</sup>), in

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760243, 32060372); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2021]一般 462 号)

收稿日期: 2021-04-03; 网络出版日期: 2022-02-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rlfer@126.com

which  $SM_0$  was the control check (CK). The results showed that: (1) straw mulching increased the contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in different degrees, and generally increased with the increase of mulching rate. Especially in  $SM_4$  and  $SM_5$ , which were significantly higher than those of the CK ( $P < 0.05$ ), but there was no significant difference between them ( $P > 0.05$ ), while total potassium (TK) decreased with the increase of mulching rate. (2) Under the condition of high straw mulching ( $SM_4$ ,  $SM_5$ ), the stoichiometry ratio of soil nutrient elements in two years was significantly higher than that of the CK ( $P < 0.05$ ), except for N:P, but there was no significant difference between  $SM_4$  and  $SM_5$  ( $P > 0.05$ ). (3) Under the condition of straw mulching, the C:N and C:P in soil were lower, which accelerated the mineralization and decomposition of soil organic matter, and also showed that the availability of P was higher. (4) The crop yield of each mulching treatment was significantly higher than that of the CK ( $P < 0.05$ ), especially under the condition of high straw mulching, the yield of crop increased significantly, and the yield of  $SM_4$  was the highest. The research showed that straw mulch on the ground is an important source of soil nutrients, which can be used as a supplementary means to supplement the soil nutrients absorbed by crops and lost with soil erosion. Based on the crop yield, the principal component analysis, grey correlation analysis, difference significance, it is suggested that straw mulching in about 6000 kg/hm<sup>2</sup> should be adopted for sloping farmland in the karst area of Southwestern China to promote the restoration of farmland ecosystem and achieve better effect of soil fertility and crop yield.

**Key Words:** straw mulching; sloping farmland; soil nutrient; ecological stoichiometry; yield; karst area of Southwestern China

西南喀斯特区是世界上石漠化面积最大、岩溶发育最典型的地带,水土地表流失和地下漏失都十分严重<sup>[1-2]</sup>。然而,坡耕地是西南喀斯特区农业生产的主要载体,频繁地耕作及不合理的土地利用加剧了区域坡耕地的水土流失。据报道,坡耕地已成为西南喀斯特区水土流失的策源地,其中贵州省尤为严重,90%的泥沙流失量主要来源于坡耕地,部分地区坡耕地岩石完全裸露,已发展到无土可侵的地步<sup>[3-4]</sup>。与此同时,导致了一系列生态问题的发生。例如,土壤养分随着水土的流失而流失,造成土壤肥力下降,加剧了土壤贫瘠程度。而土壤肥力是影响作物产量的关键因素,土壤养分的大量流失及养分间的失衡,将导致作物产量下降。土壤养分流失的同时,降低了地表覆盖物和作物根系与土壤之间的输入和周转,这两个过程直接或间接影响土壤的C、N、P、K化学计量特征<sup>[5]</sup>。毋庸置疑,水土流失造成土壤耕作质量下降,严重制约了区域农业可持续发展。

秸秆覆盖还田作为一种保护性耕作措施,可有效地减少土壤养分随水土的流失而流失,提高土壤肥力<sup>[6]</sup>。原因是覆盖于地表的秸秆作为一种缓冲介质,降雨期间可显著降低土壤养分的流失量,可起到较好的保肥效果<sup>[7]</sup>。此外,秸秆作为一种有机材料,本身含有丰富的营养物质,通过微生物腐蚀可为土壤提供C、N、P、K等营养元素<sup>[8]</sup>。相关研究表明,秸秆覆盖可补充土壤中流失的碳元素,维持土壤中碳平衡<sup>[9-10]</sup>。除此之外,秸秆覆盖还可改善作物生长发育的土壤条件,增加作物产量<sup>[11-12]</sup>。

我国开展的秸秆覆盖试验主要集中在西北黄土高原区和东北黑土区,且较为广泛地认为秸秆覆盖可以提高土壤养分和作物产量<sup>[13-14]</sup>,但相关研究表明高秸秆覆盖条件下作物产量反而有所下降<sup>[15]</sup>。西南喀斯特区秸秆资源丰富,但在当地并未得到有效利用,部分被当作家畜饲料,大部分被焚烧,造成了环境污染和资源浪费。此外,西南喀斯特地区关于秸秆覆盖的相关研究鲜见报道,且目前在西南喀斯特区暂未见到有关秸秆覆盖措施对生态化学计量特征影响的报道。

生态化学计量学是研究生态系统能量平衡与多重化学元素平衡的一门科学,是研究生态系统养分限制和循环的新手段,用于揭示各元素在生态过程中的耦合关系和共变规律<sup>[16-17]</sup>。C、N、P、K是土壤重要的营养元素,同时也是表征土壤肥力质量的重要指标,其生态化学计量特征可以有效预测养分限制类型和阈值,反映土壤供肥能力和质量状况<sup>[18]</sup>。因此,可以利用生态计量学分析揭示秸秆覆盖条件下土壤养分变化特征。

综上,开展秸秆覆盖措施研究,探索喀斯特地区秸秆覆盖对生态化学计量特征的影响及适宜秸秆覆盖量显得十分必要。因此,本文的研究目的包括:1)研究不同秸秆覆盖率下土壤养分状况及其生态化学计量特征,揭示生态系统中的C、N、P、K元素的循环、平衡机制与相互制约关系;2)研究不同秸秆覆盖率对土壤的改良效果,探索基于土壤养分的适宜秸秆覆盖量;3)通过野外径流小区试验,为西南喀斯特区农田生态系统恢复与重建提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于贵州省毕节市黔西县金兰镇(105°47′—106°27′ E, 26°46′—27°21′ N),平均海拔1250m,属亚热带季风气候,多年平均气温14.2℃,多年平均降雨量1087.05 mm,降水主要集中在6—9月。研究区土地总面积555.8 hm<sup>2</sup>,其中石漠化面积478 hm<sup>2</sup>,占土地总面积的86%;耕地面积239 hm<sup>2</sup>,其中石漠化坡耕地面积191 hm<sup>2</sup>,占耕地总面积的80%。研究区石漠化灌丛及林地以微度侵蚀为主,坡耕地等人为扰动较大的区域以轻中度侵蚀为主,少部分耕地因严重的土壤侵蚀无法耕作而弃耕。土壤类型以黄壤和黄色石灰土为主,土壤颗粒组成以黏粒和砂粒为主,粉粒占比较少。植被类型为亚热带常绿阔叶林,天然林已遭破坏,目前主要以人工林为主,主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、白杨(*Populus tomentosa* Carr)、泡桐(*Paulownia fortunei*)等。

### 1.2 试验设计

野外试验小区于2017年建成,根据前人试验研究<sup>[19]</sup>,在同一区域取样时,样本间的变异很小,即在短距离内随机取样时土壤肥力特性之间没有很大的差异,而本试验占地面积为200 m<sup>2</sup>左右,故在建成前随机获取3个土壤样本确定土壤背景值(表1),分别为土壤有机碳(SOC)、总有机碳(TOC)、全氮(TN)、全磷(TP)及全钾(TK)。试验于2018、2019年玉米生长期进行,共设置6个秸秆覆盖种植小区,规格为3m(宽)×12m(长),坡度均为15°。小区内种植玉米,种植规格大致与当地农民种植规格相同。6个种植小区包括传统玉米单作小区,即种植玉米但不覆盖(CK)及5个不同秸秆覆盖梯度的玉米耕作小区(SM<sub>1</sub>—SM<sub>5</sub>)。玉米播种时间为4—5月,播种后一次性施用魔力宝复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O比例分别为15%、13%和15%),各小区施用量一致,均为2220 kg/hm<sup>2</sup>,即每个小区约为8 kg,与刘继龙等的施用量接近<sup>[20]</sup>;玉米生长期(5月—10月)每周进行一次人工除草。秸秆就地取材,玉米秸秆晒干后切割至3 cm左右在玉米播种、施肥后按照预先设计的覆盖率均匀覆盖在小区内。参照刘柳松等<sup>[21]</sup>的方法确定秸秆覆盖率与覆盖量之间的定量关系,即当秸秆覆盖率为15%、30%、60%、75%、90%时,相应的秸秆覆盖量分别为1111、2222、3889、5556、6944 kg/hm<sup>2</sup>。

表1 覆盖种植小区土壤背景值

Table 1 Soil background value of mulching planting plot

SOC/(g/kg)	TOC/(g/kg)	TN/(g/kg)	TP/(g/kg)	TK/(g/kg)
3.27	10.54	0.57	0.62	19.91

SOC: 有机碳 Soil organic carbon; TOC: 总有机碳 Total organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium

### 1.3 取样及分析方法

试验于2018—2019年作物生长期进行,取样时间于作物收割后进行(10月份左右)。每个小区每次采样沿上、中、下坡位取土,每个样本采用三点取样法,混合均匀,带回实验室分析。土壤SOD采用重铬酸钾氧化-外加加热法进行测定,土壤TN、TP、TK分别采用克氏法、钼蓝比色法、火焰光色法进行测定。玉米成熟后,在每个小区上、中、下三个部位各选取1行进行测产<sup>[15]</sup>。以上实验每个指标每次取3个样本,并重复进行3次测量或检测;另外,考虑到喀斯特区耕作层土壤厚度较薄,一般为20—30 cm,部分地区土壤厚度甚至不到20 cm,而不到20 cm的以实际取样厚度为准,故取样深度在0—20 cm之间。

## 1.4 数据处理

在计算得到样本数据后,运用 SPSS 软件对数据进行分析处理(包括差异显著性分析、相关性分析、主成分分析和灰色关联度分析),采用 Origin 软件绘图。

### 1.4.1 主成分分析

主成分分析方法是一种降维分析,其目的在于能更多地反映原来变量( $P$ )的有关信息。一般认为,指标方差最大的是第一个主成分,在损失较少的前提下,重点分析线性变换后几个主成分的指标数据是否存在相关性,从而简化研究的问题和提升分析效率;若第一个变量无法代表所有变量的信息,则继续选取第二、三……第  $P$  个主成分,直到所选变量个数能够代表原指标的全部信息为止(即累计贡献率  $\geq 85\%$ ),进而计算各主成分综合得分<sup>[22]</sup>。

综上,各主成分得分计算公式如下:

$$\begin{cases} F_1 = Z_{11} X_1 + Z_{12} X_2 + \cdots + Z_{1j} X_j \\ F_2 = Z_{21} X_1 + Z_{22} X_2 + \cdots + Z_{2j} X_j \\ \vdots \\ F_m = Z_{p1} X_1 + Z_{p2} X_2 + \cdots + Z_{pj} X_j \end{cases} \quad (1)$$

综合得分计算公式如下:

$$F = (b_1 F_1 + b_2 F_2 + \cdots + b_n F_n) / 100 \quad (2)$$

式中, $F$  为综合得分; $b_1, b_2, \dots, b_n$  为方差贡献率; $F_1, F_2, \dots, F_m$  为各主成分得分。

### 1.4.2 灰色关联度分析

灰色关联度分析主要有以下几个步骤<sup>[23]</sup>:

#### (1) 确定分析数列

设  $n$  为评价对象的个数, $m$  为评价指标的个数,参考序列记为  $Y_0$ ,比较序列记为  $X_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ ,则有:

$$\begin{cases} Y_0 = \{y_0(k), k=1, 2, \dots, n\} \\ X_i = \{x_i(k), k=1, 2, \dots, n\} \end{cases} \quad (3)$$

#### (2) 确定灰色关联系数

根据标准化矩阵,计算参考序列与各比较序列间的灰色关联系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\frac{\min_i \min_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k)} + \rho \frac{\max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k)}}{\Delta_i(k) + \rho \frac{\max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k)}} \quad (4)$$

式中, $\Delta_i(k) = |y_0(k) - x_i(k)|$  为  $k$  点  $y_0$  与  $x_i$  绝对差; $\frac{\min_i \min_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k)}$  为两级最小绝对差; $\frac{\max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k)}$  为两级最大绝对差; $\rho$  为分辨系数,取值范围  $[0, 1]$ ,一般取值为 0.5。

#### (3) 计算灰色关联度

灰色关联度采用以下公式进行计算:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

## 2 研究结果

### 2.1 不同秸秆覆盖梯度条件下土壤 C、N、P、K 含量特征

很明显可以看出,秸秆覆盖对土壤养分影响显著(图 1)。总体而言,2018、2019 年度秸秆覆盖对土壤 SOC、TN、TP 含量的影响较为一致,具有相似的规律,即随着秸秆覆盖量的增加,土壤 SOC、TN、TP 含量总体上

也随之增加,尤其是高秸秆覆盖率条件下( $SM_4$ 和 $SM_5$ ),其含量均显著高于对照( $P < 0.05$ ),但 $SM_4$ 和 $SM_5$ 之间差异不显著( $P > 0.05$ )。与此同时,本研究还发现2019年土壤SOC、TN和TP含量较2018年有所增加。对于TK而言,2018和2019年度,其含量均随着秸秆覆盖量的增加而呈减少趋势,并且2019年较2018年有所降低,尤其是CK,降低了将近一半。结果表明,高秸秆覆盖率条件下对土壤养分指标具有显著影响。

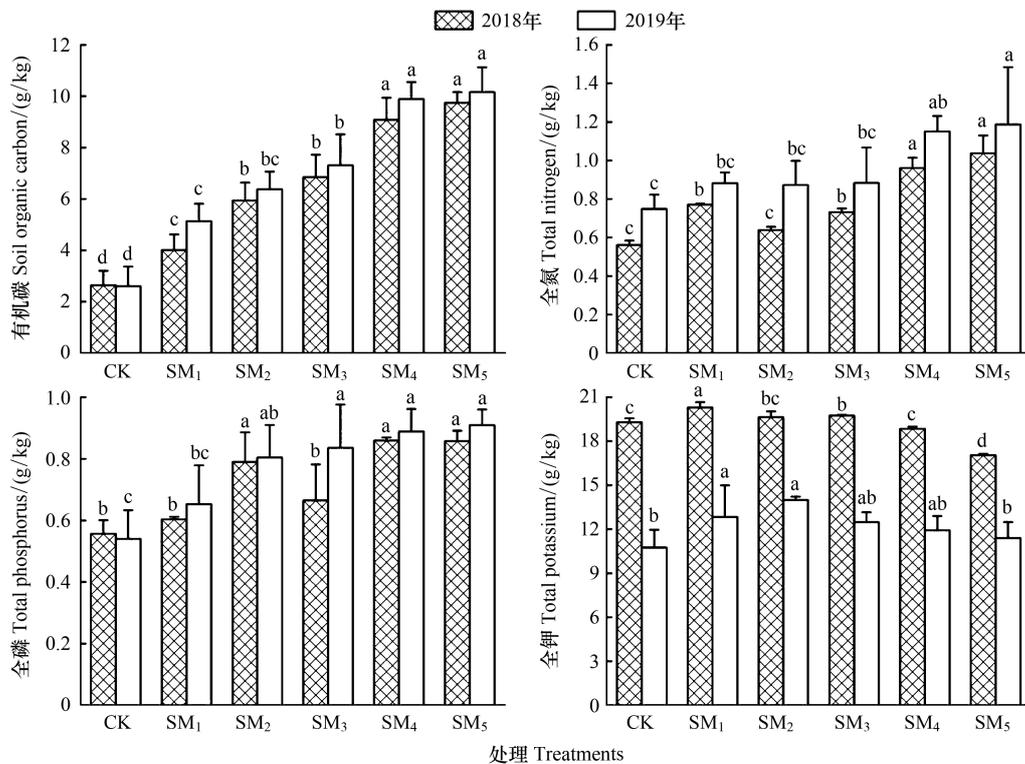


图1 不同秸秆覆盖率条件下土壤养分含量

Fig.1 The contents of soil nutrient under different straw mulching rates

CK; 对照 Control cheak; SM: 秸秆覆盖量 Straw mulching;  $SM_1$ : 1111 kg/hm<sup>2</sup>;  $SM_2$ : 2222 kg/hm<sup>2</sup>;  $SM_3$ : 3889 kg/hm<sup>2</sup>;  $SM_4$ : 5556 kg/hm<sup>2</sup>;  $SM_5$ : 6944 kg/hm<sup>2</sup>; 图中数据为平均值±标准差( $n=3$ ), 同一年不同小写字母表示不同处理之间养分差异明显( $P < 0.05$ )

## 2.2 不同秸秆覆盖梯度条件下土壤各元素化学计量比

从2018年不同秸秆覆盖率对土壤各元素化学计量比看(表2),各土壤生态化学计量比总体上是随着秸秆覆盖率的增加而呈增加的趋势,其中土壤N:P、N:K、P:K则呈波动增长的趋势。同时可以看出,高秸秆覆盖率条件下( $SM_4$ 和 $SM_5$ )各元素计量比增加较为明显,均显著高于对照( $P < 0.05$ ),但 $SM_4$ 与 $SM_5$ 之间差异不显著( $P > 0.05$ )。

从2019年数据看,土壤C:N、C:P、C:K、P:K则随着秸秆覆盖量的增加呈增加的趋势,在高秸秆覆盖率条件下( $SM_4$ 和 $SM_5$ ),其计量比同样显著高于CK( $P < 0.05$ ),但两者之间差异不明显( $P > 0.05$ )。土壤N:K则随着秸秆覆盖率的增加呈先减后增的趋势,并且高秸秆覆盖率条件下( $SM_4$ 和 $SM_5$ ),其计量比显著高于对照( $P < 0.05$ ),但 $SM_4$ 和 $SM_5$ 之间的差异不明显( $P > 0.05$ )。秸秆覆盖对土壤N:P的影响不明显,各覆盖之间没有显著差异( $P > 0.05$ )。同时,我们发现低秸秆覆盖率对土壤N:P、N:K、P:K的影响不明显, $SM_1$ 、 $SM_2$ 与CK之间均无显著差异( $P > 0.05$ )。

## 2.3 土壤化学计量特征与各元素的关系

由相关性分析可知(表3),土壤C与N:P、C:P、C:K、P:K呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与C:N、N:K呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与N:P呈不显著正相关,与K呈不显著负相关;N与C:K、N:K、P:K呈极显著正相关

( $P < 0.01$ ), 与  $P:C:P$  呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与  $C:N$ 、 $N:P$  呈不显著正相关, 与  $K$  呈不显著负相关;  $P$  与  $C:N$ 、 $C:K$ 、 $P:K$  呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与  $C:P$  呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与  $N:K$  呈不显著正相关, 与  $K$ 、 $N:P$  呈不显著负相关;  $K$  与  $C:N$ 、 $C:P$ 、 $C:K$ 、 $N:P$ 、 $N:K$ 、 $P:K$  均呈不显著负相关; 除了  $N:P$  外, 各元素计量比之间存在或多或少的显著性关系。

表 2 2018、2019 年不同秸秆覆盖率对土壤生态化学计量特征的影响

Table 2 Effects of different straw mulching application rates on soil ecological stoichiometry characteristics in 2018 and 2019

年度 Year	计量比 Stoichiometry	处理 Treatment					
		CK	SM <sub>1</sub>	SM <sub>2</sub>	SM <sub>3</sub>	SM <sub>4</sub>	SM <sub>5</sub>
2018	C:N	4.682±0.806b	5.267±0.783b	9.340±1.261a	9.359±0.948a	9.499±1.313a	9.434±0.433a
	C:P	4.704±0.647c	6.713±0.995bc	7.611±1.335b	10.661±3.196a	10.577±0.885a	11.378±0.288a
	C:K	0.137±0.031d	0.199±0.032d	0.303±0.037c	0.347±0.045c	0.482±0.043b	0.572±0.026a
	N:P	1.009±0.042b	1.275±0.008a	0.813±0.080c	1.126±0.228ab	1.119±0.067ab	1.208±0.072a
	N:K	0.029±0.002d	0.038±0.001c	0.033±0.001d	0.037±0.001cd	0.051±0.003b	0.061±0.006a
	P:K	0.029±0.003c	0.030±0.001c	0.040±0.004b	0.034±0.006c	0.046±0.001ab	0.050±0.002a
2019	C:N	3.468±0.934c	5.810±0.530b	7.343±0.539ab	8.322±0.370a	8.618±0.771a	8.819±1.550a
	C:P	4.889±1.643c	8.207±2.695ab	8.078±1.802b	8.872±1.729ab	11.139±0.420ab	11.230±1.568a
	C:K	0.239±0.050d	0.406±0.081c	0.457±0.056bc	0.584±0.065b	0.833±0.092a	0.896±0.109a
	N:P	1.397±0.120a	1.400±0.389a	1.099±0.216a	1.073±0.253a	1.303±0.168a	1.317±0.384a
	N:K	0.070±0.005b	0.069±0.009b	0.063±0.010b	0.071±0.011b	0.097±0.014a	0.079±0.027a
	P:K	0.050±0.007c	0.053±0.016c	0.058±0.008c	0.067±0.012abc	0.075±0.007ab	0.080±0.008a

CK: 对照 Control check; SM: 秸秆覆盖量 Straw mulching; SM<sub>1</sub>: 1111 kg/hm<sup>2</sup>; SM<sub>2</sub>: 2222 kg/hm<sup>2</sup>; SM<sub>3</sub>: 3889 kg/hm<sup>2</sup>; SM<sub>4</sub>: 5556 kg/hm<sup>2</sup>; SM<sub>5</sub>: 6944 kg/hm<sup>2</sup>; C:N: 碳氮比; C:P: 碳磷比; C:K: 碳钾比; N:P: 氮磷比; N:K: 氮钾比; P:K: 磷钾比; 表中数据为平均值±标准差 ( $n=3$ ), 同行不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )

表 3 土壤养分含量与生态化学计量比之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between soil nutrient content and ecological stoichiometry

	C	N	P	K	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K
C	1									
N	0.921 **	1								
P	0.963 **	0.822 *	1							
K	-0.369	-0.520	-0.227	1						
C:N	0.915 *	0.693	0.951 **	-0.071	1					
C:P	0.979 **	0.897 *	0.915 *	-0.282	0.914 *	1				
C:K	0.990 **	0.952 **	0.930 **	-0.485	0.858 *	0.962 **	1			
N:P	0.010	0.373	-0.217	-0.439	-0.348	0.062	0.108	1		
N:K	0.846 *	0.964 **	0.722	-0.727	0.564	0.799	0.908 *	0.451	1	
P:K	0.975 **	0.918 **	0.938 **	-0.538	0.852 *	0.920 **	0.988 **	0.023	0.896 *	1

C: 有机碳; N: 全氮; P: 全磷; K: 全钾; \* \* 表示在 0.01 水平呈极显著相关性; \* 表示在 0.05 水平呈显著相关性

## 2.4 不同秸秆覆盖率对土壤 C、N、P、K 生态化学计量的影响评价

### 2.4.1 基于主成分分析方法的土壤生态计量综合评价

通过主成分分析方法分析不同秸秆覆盖率对土壤养分及其化学计量特征的影响, 并根据累计贡献率大于 85% 的原则提取两个主成分 (表 4)。前两个主成分的累计贡献率分别为 69.81% 和 93.57%, 即前两个主成分就可以把土壤的全部肥力及化学计量学指标反映出来。因此, 通过主成分分析方法分析不同秸秆覆盖率对土壤养分及其化学计量指标的影响是可靠的。

将表 4 中的数据代入主成分计算公式 (1) 计算出两个主成分的得分, 再根据公式 (2) 计算得出各处理的综合得分如下 (表 5)。表中综合得分越高表示秸秆覆盖对土壤肥力改良的效果越好。可以看出, 随着秸秆覆

盖率的增加各处理的综合得分也随之提高,各处理的土壤肥力改良效果依次是  $SM_5 > SM_4 > SM_3 > SM_2 > SM_1 > CK$ ,其中  $SM_4$  和  $SM_5$  对土壤改良的效果最好,而  $CK$  和覆盖率较低 ( $SM_1$ — $SM_3$ ) 的情况下,综合得分为负值,对土壤改良效果较差。

表 4 主成分分析表

Table 4 Results of the principal component analysis

分析指标 Analysis items	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	分析指标 Analysis items	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2
C	0.147	-0.025	N:P	-0.127	0.459
N	0.086	0.154	N:K	0.053	0.243
P	0.171	-0.132	P:K	0.130	0.028
K	0.043	-0.362	特征值 Characteristics rate	7.463	1.894
C:N	0.188	-0.219	贡献率 Contribution rate/%	69.81	23.76
C:P	0.144	-0.031	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	69.81	93.57
C:K	0.128	0.040			

表 5 各处理土壤肥力改良综合得分及排名

Table 5 Comprehensive scores and ranking of soil fertility improvement of different treatment

处理 Treatment	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	综合得分 Comprehensive scores	排名 Ranking
CK	-1.409	0.510	-0.919	6
$SM_1$	-0.087	0.372	-0.522	5
$SM_2$	0.150	-1.621	-0.280	4
$SM_3$	0.249	-0.744	-0.003	3
$SM_4$	0.913	0.342	0.719	2
$SM_5$	1.052	1.140	1.005	1

#### 2.4.2 基于灰色关联度分析方法的土壤生态计量学综合评价

为进一步验证基于主成分分析法综合评价结果的准确性,运用灰色关联度分析方法对土壤化学及其生态化学计量指标进行综合评价。将各处理养分指标及其化学计量比原始数据进行标准化,并计算出各指标绝对序列的差值,再根据公式(4)计算得出各小区土壤肥力及其计量化学指标的关联系数,进而根据公式(5)计算出各处理的关联度(表 6)。关联系数可反映出不同秸秆覆盖率对土壤改良效果的优劣,关联度越大,表明该处理与最优指标集的相似程度越高,反之则关联程度越小。从表中可以看出各处理的关联度大小顺序依次为  $SM_5 > SM_4 > SM_3 > SM_2 > SM_1 > CK$ ,与主成分分析法得出的结果一致。这再次证明了秸秆覆盖率较高条件下 ( $SM_4$  和  $SM_5$ ) 对土壤的改良效果较好,而  $CK$  在没有秸秆覆盖的情况下,其对土壤的改良效果是最弱的。

表 6 土壤肥力及其计量比指标的关联系数

Table 6 Correlation coefficient of soil fertility and its stoichiometry index

处理 Treatment	C	N	P	K	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K	灰色关联度 Grey correlation degree	排序 Ranking
CK	0.335	0.475	0.495	0.778	0.402	0.392	0.333	0.787	0.481	0.487	0.497	6
$SM_1$	0.408	0.591	0.563	0.964	0.486	0.522	0.388	1.000	0.516	0.502	0.594	5
$SM_2$	0.494	0.537	0.792	1.000	0.812	0.549	0.435	0.566	0.467	0.598	0.625	4
$SM_3$	0.563	0.576	0.712	0.900	0.922	0.732	0.504	0.676	0.515	0.622	0.672	3
$SM_4$	0.887	0.880	0.972	0.816	0.980	0.904	0.781	0.797	0.783	0.828	0.863	2
$SM_5$	1.000	1.000	1.000	0.708	1.000	1.000	1.000	0.869	1.000	1.000	0.958	1

## 2.5 不同秸秆覆盖率对作物产量的影响

不同秸秆覆盖量还田对作物产量影响显著(图2)。总体而言,各覆盖处理两年的玉米产量均显著高于对照( $P < 0.05$ ),大小顺序依次是  $SM_4 > SM_5 > SM_2 > SM_3 > SM_1 > CK$ ,分别较 CK 提高了 40.4%、26.98%、26.18%、24.88%、6.68%。具体而言,2018 年  $SM_1$ — $SM_5$  分别较 CK 提高了 3.86%、22.99%、22.84%、36.67%、24.17%; 2019 年  $SM_1$ — $SM_5$  分别较 CK 提高了 9.54%、29.42%、27.20%、44.18%、29.83%。同时我们发现,与 2018 年相比,2019 年除了 CK 产量下降外,各覆盖处理产量均有所提升,其中  $SM_4$  增产最为明显,提高了 4%。

## 3 讨论

### 3.1 秸秆覆盖对坡耕地土壤养分的影响

土壤养分是衡量土壤质量状况和影响作物产量高低的重要指标,其中土壤 C、N、P、K 元素作为影响作物正常生长发育的营养物质,在作物生长过程中发挥着重要作用,并且其含量高低及成分组合状况均会受到土壤养分元素含量的影响<sup>[24]</sup>。秸秆作为防止土地退化和生态系统受损的重要地表覆盖物,对土壤理化性质的影响具有重要作用。因为生态系统中作物、覆盖物和土壤之间的养分可相互转换<sup>[25]</sup>,即覆盖在地表的秸秆腐解后可向土壤中输送养分,进而为作物的生长发育提供营养物质。相关研究表明,秸秆覆盖可补充土壤中的有机碳,每年覆盖  $1000 \text{ kg/hm}^2$  的秸秆(玉米、小麦或者水稻)于地表可固碳  $130 \text{ kg/hm}^2$ <sup>[26]</sup>。与此同时,秸秆可提高土壤中的 N、P、K 含量也得到了广泛证实<sup>[27—28]</sup>。可以说,秸秆覆盖一定程度上缓解了土壤养分的供需矛盾。本研究表明,秸秆覆盖不同程度上提高了土壤 SOC、TN 及 TP 含量,同时其含量均高于对照,并且 2019 年较 2018 年有所提升;但对于 TK 而言,随着秸秆覆盖量的增加而呈减少趋势,并且 2019 年较 2018 年有所下降。秸秆覆盖提高土壤 SOC、TN 及 TP 的原因可能是秸秆覆盖地表充当了一种缓冲介质,减少了降雨对地表的直接冲刷,尤其是在作物种植初期,作物覆盖率较低的情况下,保护地表免受侵蚀,进而减少了土壤养分的流失;再者,正如前文所述,覆盖在地表的秸秆本身具有丰富的 C、N、P 等营养元素,经过长时间的生物降解,将其自身的 C、N、P 元素转化到土壤中,成为作物可吸收利用的有机质、碱解氮和有效磷,补充被作物吸收及流失的营养元素<sup>[8]</sup>。TK 随着秸秆覆盖的增加而减少的原因可能与土壤水分含量和 K 浓度有关。根据 Rosolem 等<sup>[29]</sup> 研究结果表明,当土壤溶液中 K 浓度以及土壤水分含量较高时,将会导致土壤中的 K 向更深土层淋溶和沉淀。从本研究不同秸秆覆盖率条件下土壤水分含量变化情况看(表 7),我们发现随着秸秆覆盖率的提高,2018—2019 年土壤含水量总体上呈现出随之增加的趋势,并且  $SM_4$  和  $SM_5$  均显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),故可能导致土壤 TK 含量随秸秆覆盖率的增加而呈现出下降的趋势。另一原因可能与覆盖厚度有关,高秸秆覆盖条件下,由于秸秆下层与地表土壤接触得较为紧密,而上层秸秆与地表形成隔离状态,因此只有下层秸秆在腐蚀后向土壤中输送营养物质。再者,土壤 TK 含量下降的原因还可能与 K 肥的施加量有关,因为秸秆腐解释放能量是一个长期的过程,仅靠秸秆不足以补给土壤 K 的消耗。当然,TK 下降的原因还可能与地质结构、气候等因素有关。同时我们发现 2019 年 CK 中的土壤 SOC、TP 较 2018 年有所下降,原因可能与作物对土壤养分吸收及水土流失有关,前期试验表明 CK 的水土流失较秸秆覆盖小区严重,导致土壤中容易淋溶的元素随水土的流失而流失<sup>[30]</sup>。

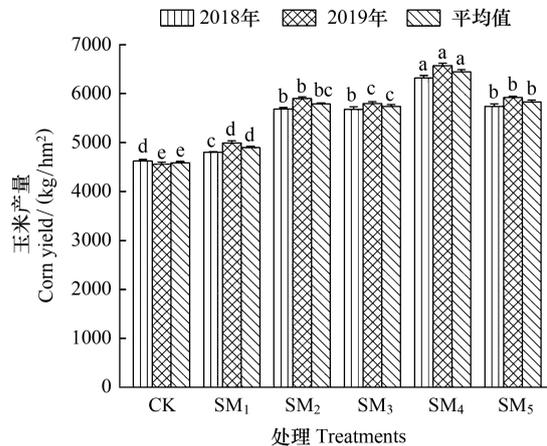


图 2 2018、2019 年度不同秸秆覆盖处理作物产量

Fig. 2 Crop yield under different straw mulching application rates in 2018 and 2019

图中数据为平均值±标准差( $n = 3$ ),同一年不同小写字母表示不同处理之间的产量差异明显( $P < 0.05$ )

表 7 2018、2019 年不同秸秆覆盖率条件下土壤水分含量变化特征

Table 7 Variation characteristics of soil moisture content under different straw application rates in 2018 and 2019

处理 Treatment	2018	2019	处理 Treatment	2018	2019
CK	20.19±1.19b	20.26±1.46c	SM <sub>3</sub>	20.55±1.13b	21.46±1.67b
SM <sub>1</sub>	20.56±1.71b	20.82±1.76bc	SM <sub>4</sub>	21.29±0.88a	23.40±1.58a
SM <sub>2</sub>	20.28±1.51b	21.11±1.73b	SM <sub>5</sub>	21.33±0.93a	23.57±1.49a

### 3.2 秸秆覆盖对坡耕地土壤生态化学计量特征的影响

土壤 C、N、P、K 化学计量比是土壤元素平衡的一个重要指标,反映了土壤内部的 C、N、P、K 循环,可用于判断土壤养分和土壤肥力的潜在价值<sup>[31-32]</sup>,同时也可作为养分限制的预测性指标<sup>[33]</sup>。与全国及全球土壤中 C:N、C:P 和 N:P 相比,西南喀斯特坡耕地秸秆覆盖条件下的土壤 C:N、C:P 和 N:P 均低于全国和全球土壤中的平均值(表 8)。本研究中土壤 C:N、C:P 低于全国和全球说明了西南喀斯特区坡耕地秸秆覆盖条件下有机质矿化速率加快和 P 的有效性较高。同时我们发现秸秆覆盖处理的 C:N、C:P 均高于对照,表明秸秆覆盖一定程度上可减缓坡耕地土壤较快的矿化速率,有利于土壤有机质的积累。土壤 C:N 较低的原因在于秸秆腐质分解过程中 C 的矿化分解程度大于 N 的分解程度,并且秸秆覆盖于地表后会释放较多的氮素<sup>[37]</sup>。同样是在秸秆覆盖条件下,本研究 C:N、C:P 也均低于黄土高原区和华南地区。低于黄土高原的原因是西南喀斯特区降雨量较多且积温量较高,使得有机质矿化速率加快<sup>[35]</sup>;低于华南茉莉园的原因可能是种植作物的不同所致,作物对土壤营养物质的吸收不同导致计量比也存在差异<sup>[36]</sup>。N:P 是衡量 N 饱和的诊断指标,同时也是用于确定养分限制的阈值<sup>[38-39]</sup>,指示作物生长过程中土壤营养成分的供应情况<sup>[33]</sup>。一般而言,N:P 对作物限制的阈值为 14(N)和 16(P),比值小于 14 表明 N 限制作物生长,大于 16 则表明 P 限制作物生长,在 14—16 之间则受 N、P 两者的共同限制<sup>[40]</sup>。本研究中土壤层较低的 N:P 说明各小区作物生长均受 N 的限制,较低的 C:P、N:P 则表明该地区土壤养分处于缺 N 富 P 的状态。相对于土壤 C、N、P 计量比的研究,K 元素的研究较少。本研究土壤中 C:K、N:K、P:K 随着秸秆覆盖率的增加而增加,原因主要是随着秸秆覆盖率的增加土壤 C、N、P 含量呈增加,K 含量呈下降趋势所致。

另外,本研究中土壤 SOC 与 N、P、C:N、C:P、C:K、N:K、P:K 均存在显著正相关关系,与以往的研究类似<sup>[41-43]</sup>,这也表明了秸秆覆盖条件下土壤各元素之间存在平衡和耦合关系,同时也说明了有机质在促进土壤养分循环的过程中占主导地位。K 和 N:P 与其它元素之间均不存在显著关系,说明它们之间缺乏显著的增强或抑制效应<sup>[44]</sup>。土壤各营养元素在增加土壤肥力、提高作物产量均扮演着重要的角色,不同养分元素之间相互联系、相互影响,并且共同限制,缺少任何一元素都会对土壤肥力、作物生长发育及其产量产生消极影响。

表 8 西南喀斯特坡耕地土壤 C、N、P 计量特征与全国及其他地区土壤的比较

Table 8 Stoichiometry characteristics of soil C, N and P on sloping farmland in karst area of Southwestern China compared with that in China and other regions

地区 Area	试验时间 Experiment time	C:N	C:P	N:P	文献来源 References
西南喀斯特区 Karst area of Southwestern China	2018	4.7—9.5	4.7—11.4	1.0—1.3	本研究
	2019	3.5—8.6	4.9—11.2	1.1—1.4	
全国 China	—	11.9±0.1	61.0±0.9	5.2±0.1	[33]
全球 Global	—	14.3±0.5	186.0±12.9	13.1±0.8	[34]
黄土高原 The Loess Plateau	2016—2017	10.1—12.1	10.5—12.1	0.99—1.1	[35]
华南地区 South China	2015	9.9±0.2	27.4±0.6	2.77±0.1	[36]

### 3.3 基于土壤肥力和作物产量的适宜秸秆覆盖量探讨

正如前文所述,长期以来,西南喀斯特地区的秸秆资源并未得到合理的利用,造成了资源浪费和环境污染。而农作物秸秆的高效化、合理化利用则是实现废弃物资源再利用、缓解环境污染的重要手段,并可起到一

定的增肥增产效果。总体而言,本研究中秸秆覆盖提高了土壤 C、N、P 含量,并随着覆盖量增加总体呈增加趋势;与此同时,秸秆覆盖显著提高了作物产量。对于土壤 C、N、P 化学计量比而言,较低的 C:N、C:P 加快了土壤有机质矿化速率,同时有利于加快有机物的腐解,使土壤中可利用的营养元素增加。本研究中对照和覆盖率较低小区(SM<sub>1</sub>—SM<sub>3</sub>)土壤 C:N、C:P 均低于覆盖率较高的小区(SM<sub>4</sub>和 SM<sub>5</sub>),说明在无覆盖和覆盖率较低时土壤营养元素可在短时间内富集,但这种情况下更易导致土壤养分随水土的流失而流失,并且低覆盖率条件下土壤中产生的营养元素不能满足作物的吸收利用。而高秸秆覆盖率条件下既可向土壤输送丰富的营养物质,又可起到保持水土的效果。另外,通过主成分分析和灰色关联度分析方法综合评价不同秸秆覆盖率对土壤的改良情况,我们发现 SM<sub>5</sub> 排名最高,其次是 SM<sub>4</sub>,对土壤肥力改良效果较好。但从各处理玉米产量来看,SM<sub>4</sub> 的产量是最高的,而秸秆覆盖量更高的 SM<sub>5</sub> 产量反而有所降低,原因可能是覆盖厚度随着覆盖量增加而增加,导致幼苗无法冲破覆盖在地表的秸秆而产生黄苗的情况,出苗率降低,从而导致产量下降。这说明了并不是秸秆覆盖率越高对作物生长发育越好。相关研究表明,秸秆覆盖在耕地里会发生复杂的化学反应,可导致病虫害的发生,秸秆覆盖量过多,反而增加作物病虫害风险,导致作物减产<sup>[45-46]</sup>。结合差异显著性分析结果,本研究表明 SM<sub>4</sub> 和 SM<sub>5</sub> 提高土壤养分较为明显( $P < 0.05$ ),但两者之间差异不显著( $P > 0.05$ ),这反映了西南喀斯特区秸秆覆盖量在 5556—6944 kg/hm<sup>2</sup> 之间改良土壤的效果较为理想。

秸秆覆盖量过高或过低都不能达到较好的土壤改良和作物增产效果,因此综合主成分、灰色关联度及差异显著性分析结果,同时考虑到当地农民所能承受的经济范围内,我们认为 6000 kg/hm<sup>2</sup> 左右的秸秆覆盖量可能是西南喀斯特坡耕地较为适宜的覆盖范围。这与高日平等<sup>[15]</sup> 在内蒙古黄土高原地区开展的秸秆覆盖还田试验一致,他们认为 6000 kg/hm<sup>2</sup> 的秸秆覆盖量对土壤为培肥和提高作物产量效果较好。但适宜秸秆覆盖量往往会因地而异,恒河三角洲盐渍土开展的秸秆覆盖试验表明,覆盖 5000 kg/hm<sup>2</sup> 的稻草秸秆显著改善了作物的生长和产量<sup>[47]</sup>。而 Kesterna<sup>[11]</sup> 的秸秆覆盖试验表明,10000 kg/hm<sup>2</sup> 的秸秆覆盖量可获得较好的番茄产量效果。因此,基于土壤肥力改良的适宜秸秆覆盖率需要针对不同地区的地质、气候等综合因素而定。

#### 4 结论

覆盖于地表的秸秆作为土壤营养元素的重要来源,可将其作为一种补充手段以补给土壤中被作物吸收和随水土流失而流失的土壤养分,从而提高土壤肥力。秸秆覆盖条件下土壤 C:N、C:P 较低,有利于加速土壤有机质矿化分解,同时说明 P 的有效性较高。秸秆覆盖不同程度上增加了作物产量,其中 SM<sub>4</sub> 处理的产量最高。通过主成分、灰色关联度及差异显著性分析,同时结合作物产量,建议在西南喀斯特坡耕地覆盖 6000 kg/hm<sup>2</sup> 左右的秸秆促进农田生态系统中作物—覆盖物—土壤间物质与养分的良性循环,以期达到较好的土壤增肥、作物增产效果。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 陈洪松,冯腾,李成志,付智勇,连晋姣,王克林.西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望.水土保持学报,2018,32(1):10-16.
- [ 2 ] Dai Q H, Peng X D, Wang P J, Li C L, Shao H B. Surface erosion and underground leakage of yellow soil on slopes in karst regions of southwest China. Land Degradation & Development, 2018, 29(8): 2438-2448.
- [ 3 ] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,严友进,彭旭东.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征.应用生态学报,2016,27(9):2754-2760.
- [ 4 ] Li R, Wu Q L, Zhang J J, Wen Y Q, Li Q G. Effects of land use change of sloping farmland on characteristic of soil erosion resistance in typical karst mountainous areas of southwestern China. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 28(4): 2707-2716.
- [ 5 ] 海旭莹,董凌勃,汪晓珍,邓蕾,李继伟,刘玉林,李妙宇,潘英杰,吕文文,上官周平.黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响.生态学报,2020,40(23):8570-8581.
- [ 6 ] Jordán A, Zaval L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. Catena, 2010, 81(1): 77-85.
- [ 7 ] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, Zhang G S, Li D B, Xiong G Y, Chen F. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China. Agricultural Water Management, 2012, 110: 34-40.
- [ 8 ] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,梁国庆,周卫.中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力.植物营养与肥料学报,2018,24(1):1-21.
- [ 9 ] Dossou-Yovo E R, Brüggemann N, Ampofo E, Igue A M, Jesse N, Huat J, Agbossou E K. Combining no-tillage, rice straw mulch and nitrogen fertilizer application to increase the soil carbon balance of upland rice field in northern Benin. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 152-159.

- [10] Bajgai Y, Hulugalle N, Kristiansen P, McHenry M, Cowie A. Residue incorporation mitigates tillage-induced loss of soil carbon in laboratory microcosms. *Soil Use and Management*, 2014, 30(3): 328-336.
- [11] Kosterna E. The effect of soil mulching with straw on the yield and selected components of nutritive value in broccoli and tomatoes. *Folia Horticulturae*, 2014, 26(1): 31-42.
- [12] Wang L, Qin T, Liu T Q, Guo L J, Li C F, Zhai Z B. Inclusion of microbial inoculants with straw mulch enhances grain yields from rice fields in central China. *Food and Energy Security*, 2020, 9(4): e230.
- [13] Tan C J, Cao X, Yuan S, Wang W Y, Feng Y Z, Qiao B. Effects of long-term conservation tillage on soil nutrients in sloping fields in regions characterized by water and wind erosion. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17592.
- [14] Fan W, Wu J G, Li J M, Hu J. Comparative effects of different maize straw returning modes on soil humus composition and humic acid structural characteristics in Northeast China. *Chemistry and Ecology*, 2018, 34(4): 355-370.
- [15] 高日平, 赵思华, 高宇, 韩云飞, 任永峰, 赵沛义. 内蒙古黄土高原秸秆还田对土壤养分特性及玉米产量的影响. *北方农业学报*, 2019, 47(4): 52-56.
- [16] 方瑛, 安韶山, 马任甜. 云雾山不同恢复方式下草地植物与土壤的化学计量学特征. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 80-88.
- [17] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 党晓宏, 蒙仲举, 陈晓娜, 段娜. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2019, 39(15): 5594-5602.
- [18] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 杜海伦, 张雄清, 郭文福, 孙建军. 广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2020, 40(4): 1207-1218.
- [19] 杨俐苹. 评价区域性土壤肥力的取样技术的回顾与展望. *土壤肥料*, 2000, (1): 3-8.
- [20] 刘继龙, 李佳文, 周延, 付强, 张玲玲, 刘璐. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 333-339.
- [21] 刘柳松, 任红艳, 史学正, 于东升, 王洪杰, 孙维侠, 张黎明. 秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 108-112.
- [22] 陈宏寿. 基于 PCA 的广东省区域经济发展水平实证分析. *辽宁工业大学学报: 社会科学版*, 2021, 23(1): 26-30.
- [23] 任永泰, 于浩然, 刘慧, 王会英. 基于因子分析与灰色关联的生态农业经济竞争力评价——以黑龙江省为例. *生态经济*, 2020, 36(12): 85-92, 153-153.
- [24] 陈印平, 夏江宝, 赵西梅, 诸葛玉平. 黄河三角洲典型人工林土壤碳氮磷化学计量特征. *土壤通报*, 2017, 48(2): 392-398.
- [25] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [26] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 281-305.
- [27] Steenwerth K, Belina K M. Cover crops and cultivation: impacts on soil N dynamics and microbiological function in a Mediterranean vineyard agroecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2): 370-380.
- [28] 刘世亮, 介晓磊, 李有田, 丁克强, 安志装. 土壤-植物根际磷的生物有效性研究进展. *土壤与环境*, 2002, (2): 178-182.
- [29] Rosolem C A, Sgariboldi T, Garcia R A, Calonego J C. Potassium leaching as affected by soil texture and residual fertilization in tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(16): 1934-1943.
- [30] 盘礼东, 李瑞, 黎庆贵, 黄凯, 张琳卿. 黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 9-16.
- [31] 卢同平, 史正涛, 牛洁, 张文翔. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望. *土壤*, 2016, 48(1): 29-35.
- [32] 王晓光, 乌云娜, 宋彦涛, 霍光伟, 张凤杰. 土壤与植物生态化学计量学研究进展. *大连民族大学学报*, 2016, 18(5): 437-442, 449-449.
- [33] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [34] 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.
- [35] 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[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [36] 林少颖, 赖清志, 刘旭阳, 金强, 阳祥, 尹晓雷, 曾瑜, 王维奇. 秸秆及配施生物炭对福州茉莉园土壤碳、氮、磷、铁含量及其生态化学计量学特征影响. *环境科学学报*, 2021: 1-15. [2021-06-30]. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2020.0320>.
- [37] 龚静静, 胡宏祥, 朱昌雄, 汤咪咪, 夏星. 秸秆还田对农田生态环境的影响综述. *江苏农业科学*, 2018, 46(23): 36-40.
- [38] Zhao F Z, Kang D, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 415-422.
- [39] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534.
- [40] 王璐, 喻阳华, 邢容容, 秦仕忆. 喀斯特高寒干旱区不同经济树种的碳氮磷钾生态化学计量特征. *生态学报*, 2018, 38(15): 5393-5403.
- [41] He X J, Hou E Q, Liu Y, Wen D Z. Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24261.
- [42] Shen Y X, Yu Y, Lucas-Borja M E, Chen F J, Chen Q Q, Tang Y Y. Change of soil K, N and P following forest restoration in rock outcrop rich karst area. *Catena*, 2020, 186: 104395.
- [43] 张莎莎, 李爱琴, 王会荣, 王晶晶, 徐小牛. 不同海拔杉木人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 97-104.
- [44] 喻阳华, 钟欣平, 郑维, 陈志霞, 王俊贤. 喀斯特森林不同演替阶段植物群落物种多样性、功能性状、化学计量及其关联. *生态学报*, 2021, 41(6): 2408-2417.
- [45] 肖继兵, 杨久廷, 辛宗绪. 辽西地区秸秆覆盖试验研究. *节水灌溉*, 2008, (2): 8-10, 13-13.
- [46] 孙力, 盖志佳, 王谦玉, 张敬涛. 中国秸秆覆盖研究现状及展望. *安徽农学通报*, 2015, 21(7): 96-98.
- [47] Paul P L C, Bell R W, Barrett-Lennard E G, Kabir E. Straw mulch and irrigation affect solute potential and sunflower yield in a heavy textured soil in the Ganges Delta. *Agricultural Water Management*, 2020, 239: 106211.