

豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响^{*}

杜威¹ 王紫泉¹ 和文祥^{1, 2†} 高亚军^{1, 2} 曹卫东³

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要 渭北旱塬是我国重要的农业生态区, 但土壤贫瘠、水土流失严重, 亟需培肥土壤、改善生态环境。为探究渭北旱塬地区夏闲期种植并翻压豆科绿肥后土壤养分及其生态化学计量学特征的变化规律, 采用田间定位试验, 分别设置了3种豆科绿肥(绿豆、大豆和长武怀豆)和4个施氮水平, 连续6年种植并翻压绿肥后, 分析了土壤中养分含量, 采用生态化学计量学方法计算了不同条件下的生态化学计量比值。结果表明: 与对照(休闲)处理相比, 长期种植并翻压豆科绿肥能显著提高土壤有机碳、全氮和碱解氮等养分指标含量, 3种养分分别提高了4.47%~15.35%、5.21%~6.25%和11.00%~14.35%, 且均以怀豆处理提升效果最佳。翻压绿肥短期内(2周后), 土壤全氮含量的提升幅度大于有机碳和碱解氮。怀豆处理的有机碳、全氮、碱解氮、全磷和有效磷含量在短期和长期内均显著升高, 培肥效果最为明显。翻压绿肥后, 短期内土壤C:N降低, 但从长期效应来看, 翻压绿肥提高了土壤C:N, 有利于土壤有机质的积累, 能有效改善土壤养分平衡状态。土壤C:P和N:P与土壤C、N含量变化关系较为密切。夏闲期长期种植并翻压绿肥明显改善了土壤碳、氮养分状况, 是渭北旱塬地区土壤培肥的有效措施。

关键词 渭北旱塬; 绿肥; C:N; C:P; N:P

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A

渭北旱塬地处黄土高原南部台塬和残塬沟壑区, 是典型的雨养农业区, 降水偏少、水土流失严重、土壤贫瘠是该地区的气候和生态特征。该地区土地利用方式比较单一, 种植制度为一年一熟或两年三熟, 粮食作物主要为小麦和玉米, 经济作物则以苹果为主。据统计, 该地区夏季休闲地约占当地耕地的52.8%, 夏闲期长达70~100 d, 严重浪费了光热资源, 并且由于缺乏植被覆盖而不利于土壤水分保蓄, 夏闲地贮水量仅为同期降水量的30%左右^[1]。

土壤肥力是农业可持续发展的基础^[2], 维持农业生态系统的良性运转需要重视土壤中的养分储备, 从而为物质循环和能量流动创造良好的协同环境。渭北黄土旱塬区土壤有机质与土壤水分含量较低, 从而出现了肥料利用率不高、土壤硝态氮累积等现象^[3], 严重制约了当地农业的可持续发展。因此, 培肥土壤、提高土地和气候资源利用率是渭北旱塬地区亟待解决的问题^[4]。

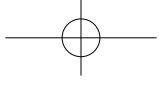
绿肥具有培肥地力、改善生态环境和固氮减碳的作用, 能够改良瘠薄土壤, 提高土地利用率^[5]。

^{*} 国家公益性行业(农业)科研专项(201103005, 200803029)、西北农林科技大学“基本科研业务费科研创新重点项目”(ZD2013012)资助 Supported by the National Agro-scientific Research Programs in Public Interest (Nos. 201103005 and 200803029) and the “Basic Scientific Research Expenses of Major Project of Scientific Research Innovation” of Northwest Agriculture and Forestry University (No. ZD2013012)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wenxiang.he@nwfu.edu.cn

作者简介: 杜威(1993—), 男, 山东东明人, 硕士研究生, 主要从事生物化学活性研究。E-mail: wdu9393@163.com

收稿日期: 2016-12-16; 收到修改稿日期: 2017-03-02; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-04-13



研究表明,施用有机肥能有效提高土壤微生物活性,达到改良土壤物理性状、提升土壤有机质含量等效果^[6-7]。其中,尤其以种植并翻压豆科绿肥所获得的生态与社会效益最为显著^[5]。种植并翻压豆科绿肥能明显减少土壤侵蚀、改善土壤结构、提升土壤肥力、减少作物的连作障碍及确保后茬作物的产量与品质^[8]。

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科学,主要强调碳(C)、氮(N)、磷(P)3种主要组成元素的关系^[9]。借助生态化学计量比值这一工具,研究C、N、P循环和平衡机制,有助于揭示生态系统过程影响因素及其作用机制。国外对生态化学计量学的研究领域较为广泛,包括消费者驱动的养分循环、生物的养分限制、种群动态、森林演替与衰退以及生态系统养分供应与需求的平衡等方面^[9]。中国学者的研究主要集中于植物组织C、N、P生态化学计量学特征方面,对森林、草原及湿地土壤生态化学计量特征也有一定研究^[10-13],但是对农田土壤的关注则相对较少。由于种植和施肥等管理措施的不同,农田土壤C、N、P等养分状况容易失衡,养分的失衡则会限制土壤生产力。运用生态化学计量学理论指导土壤养分管理,可为农田土壤培肥和维持较高的生产力提供一定的指导。因此,近年来,一些研究也开始将生态化学计量的理论用于农田土壤的生产与管理。例如,杨军伟等^[14]通过生态化学计量学研究发现,长期植烟土壤有机碳大量消耗,土壤C:N、C:P显著下降,导致土壤退化,生产力降低,并建议施用有机肥培肥土壤。张雅蓉等^[15]对长期施肥土壤生态化学计量学特征的研究表明,有机和无机肥料配施能够较好地维持土壤养分平衡,提升土壤肥力。可见,生态化学计量学理论有助于更好地进行农田生产管理。

本文通过研究渭北旱塬夏闲期长期翻压豆科绿肥对旱地土壤C、N、P养分含量及生态化学计量学特征的影响,为渭北旱塬区土壤有效利用及培肥提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于黄土高原中南部的陕西省长武县丁家镇十里铺村(107°44'703"E, 35°12'787"N),

海拔1 220 m,该地区地势平坦,属于西北内陆暖温带半湿润大陆性季风气候,四季冷暖干湿分明,年均气温9.1℃,无霜期171 d。热量丰富,年日照2 227 h,积温2 994℃,年均降水588 mm,且季节性分布不均,多集中于夏秋季节,雨热同季。

试验地土壤为黄盖黏黑垆土(堆垫干润均腐土, Cumuli-Ustic Isohumosols),母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,全剖面土质均匀疏松,通透性好,肥力中等。试验前土壤有机碳含量为6.96 g kg⁻¹,全氮0.79 g kg⁻¹,全磷0.66 g kg⁻¹,碱解氮13.74 mg kg⁻¹,有效磷24.6 mg kg⁻¹,速效钾161.39 mg kg⁻¹,pH 8.11。试验区耕层土壤大多贫氮少磷,钾素丰富。研究区农业生产主要依赖生育期的天然降水和前期土壤蓄水,属于典型的旱作农业区。

1.2 试验设计

试验包括4种处理:休闲、绿豆(*Phaseolus radiatus* L.)、大豆[*Glycine max* (L.) Merr.]和长武怀豆(*Glycine ussuriensis* Regel et Maack);冬小麦(*Triticum aestivum* L.)生长季施氮量设4个水平,即N₀:不施氮肥、N₁:当地常规施氮量80%(108 kg hm⁻²)、N₂:当地常规施氮量(135 kg hm⁻²)、N₃:当地常规施氮量120%(162 kg hm⁻²)。完全方案,共16个处理,田间排列采用裂区设计,以豆科绿肥为主区,施氮量为副区,重复3次,副区面积5 m×6 m=30 m²,小区间宽30 cm。

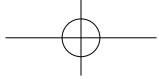
本试验为2008年开始的长期定位试验,每年6月底收获完小麦后立即播种绿肥,9月中旬收获并将绿肥切碎翻压于土壤中,翻压深度20 cm,翻压量约2 500 kg hm⁻²(以鲜重计)。10月初播种冬小麦,氮肥在冬小麦播前一次性施入,同时施用P₂O₅ 120 kg hm⁻²;小麦收获后施用P₂O₅ 40 kg hm⁻²。

1.3 土壤样品采集与指标测定

分别在2014年6月(小麦收获后)和9月(绿肥翻压2周后),以五点法采集耕层0~20 cm土样,土样过筛后测定土壤养分指标。有机碳用外加热法,全氮用凯氏法,全磷用NaOH熔融-钼锑抗比色法,碱解氮用碱解扩散法,有效磷用NaHCO₃提取-钼锑抗比色法^[16]。

1.4 数据处理

本研究中土壤C:N:P比值为元素质量比。采用Microsoft Excel 2010和DPS7.55软件分析数据,显著性分析采用最小显著差异法(LSD法)。



2 结 果

2.1 小麦收获和绿肥翻压后土壤养分特征

土壤有机碳在改善土壤结构及保持土壤质量等方面有重要作用, 其含量能有效表征土壤肥力的高低^[17]。表1显示, 小麦收获后, 各处理有机碳含量在8.39~10.61 g kg⁻¹之间变化, 其中, 绿肥处理有机碳含量均值显著高于休闲处理, 且三种绿肥之间差异显著, 其含量均值大小顺序为怀豆(10.07) > 大豆(9.62) > 绿豆(9.12) > 休闲(8.73), 表明长期种植并翻压绿肥对土壤有机碳含量有显著影响。与N₀处理相比, 三种不同施氮量处理的有机碳含量均值均无显著变化, 且N₃处理的有机碳含量(9.58)最高。翻压绿肥后, 有机碳含量在9.18~10.65 g kg⁻¹之间波动(表2)。与休闲处理相比, 绿豆和怀豆处理显著提高了有机碳含量, 大豆处理提升效果不明显, 均值大小顺序是怀豆(10.55) > 绿豆(10.10) > 大豆(9.80) ≈ 休闲(9.59)。施用氮肥处理的有机碳含量均值均显著高于N₀处理, 有机碳含量最大的是N₂处理(10.30)。与休闲处理相比, 翻压前绿肥处理土壤有机碳增幅为4.47%~15.35%, 翻压后增幅为2.19%~10.01%, 后者较前者小, 且翻压前后怀豆处理的提升效果均最好。

土壤全氮是供应植物有效氮素的源和库, 综合反映了土壤氮素状况, 不同的土地利用方式会影响其含量及分布^[18]。小麦收获后, 全氮含量介于0.90~1.08 g kg⁻¹之间, 绿肥处理全氮含量均值显著高于休闲处理(0.96), 但三种绿肥处理之间差异不显著。施用氮肥处理的全氮含量均显著高于N₀处理, N₃处理的全氮含量(1.03)最高。绿肥翻压后, 全氮含量在0.93~1.28 g kg⁻¹之间变化, 翻压绿肥处理全氮含量显著高于休闲处理, 其均值含量大小顺序为怀豆(1.13) ≈ 大豆(1.12) > 绿豆(1.10) > 休闲(0.94)。与N₀处理相比, 仅有N₃处理的全氮含量(1.11)有显著提高。绿肥翻压提高了土壤全氮含量, 与休闲处理相比, 绿肥处理全氮含量的提升幅度(17.02%~20.21%)较翻压前(5.21%~6.25%)更大。

土壤碱解氮易被植物吸收, 可作为土壤有效氮的指标, 代表土壤供氮强度。绿肥翻压前后, 土壤碱解氮含量分别为52.56~74.25 mg kg⁻¹、

48.39~67.58 mg kg⁻¹, 表明, 翻压绿肥后土壤碱解氮含量稍微降低。翻压前, 绿肥处理的碱解氮含量变化规律与全氮相同且各施氮水平的碱解氮含量均低于N₀处理(63.82)。绿肥翻压后, 碱解氮含量均值的大小顺序是怀豆(63.41) > 绿豆(58.19) > 大豆(56.73) > 休闲(51.73)。N₂与N₃处理显著提高了土壤碱解氮含量。与休闲处理相比, 绿肥处理土壤碱解氮含量显著提高, 并以怀豆处理提升幅度最大, 且翻压后增幅(22.58%)高于翻压前(14.35%)。

全磷含量是土壤肥力的重要指标, 表明土壤磷库的大小, 受成土母质和耕作施肥等影响较大^[19]。土壤全磷含量在小麦收获后介于0.96~1.14 g kg⁻¹间, 绿肥处理全磷含量与休闲处理之间差异不明显, 各施氮水平的全磷含量也无显著差异。绿肥翻压后, 土壤全磷含量在0.94~1.23 g kg⁻¹之间变化, 各处理表现为大豆(1.16) ≈ 怀豆(1.15) > 绿豆(1.10) > 休闲(1.02)。对于施氮处理, 翻压绿肥后, 仅有N₁处理的全磷含量显著低于N₀处理。

土壤有效磷是能被植物直接吸收和利用的无机磷或者小分子有机磷组分, 可作为评价土壤供磷能力的重要指标^[20]。小麦收获后, 土壤有效磷含量在10.10~27.67 mg kg⁻¹之间, 大小顺序为大豆(21.90) > 怀豆(18.34) > 绿豆(14.92) ≈ 休闲(14.30)。与休闲处理相比, 大豆处理显著提高了土壤有效磷含量, 另外两种绿肥处理提升效果不明显。与全磷的规律类似, 各施氮水平的有效磷含量也无显著差异, 但是N₁处理的含量最小。绿肥翻压后, 土壤有效磷含量介于19.19~37.18 mg kg⁻¹间, 土壤有效磷含量有了较大的提升。与休闲处理相比, 仅有怀豆处理显著提高了土壤有效磷含量, 提升幅度为40.25%。绿肥翻压后, 各施氮量处理的有效磷含量均无显著差异。

2.2 不同绿肥及施氮水平下土壤生态化学计量学特征

本长期定位试验布置前, 土壤的C:N、C:P和N:P分别为8.81、10.55、1.20, 均低于全国0~10 cm土层平均水平(12.34、52.65、4.20)^[21]。

土壤C:N变化如图1A和图1B所示。小麦收获后, 休闲处理土壤C:N的变化范围是8.92~9.35, 平均值为9.15。绿肥处理C:N在8.46~10.11之间, 其中, 绿豆处理均值(9.06)小于休闲处



表1 小麦收获后土壤养分特征

Table 1 Soil nutrient status after wheat harvested						
绿肥处理 Green manure	施氮量 N fertilizer rate (kg hm ⁻²)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N (mg kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)
休闲 Fallow	0	8.81 ± 0.05a	0.95 ± 0.01b	60.07 ± 1.18a	1.12 ± 0.01a	12.65 ± 2.64b
	108	8.39 ± 0.20b	0.90 ± 0.01c	53.40 ± 3.54b	1.07 ± 0.01a	13.07 ± 3.00b
	135	9.01 ± 0.13a	0.99 ± 0.01a	56.73 ± 1.18a	0.96 ± 0.02a	10.10 ± 4.32c
	162	8.71 ± 0.47a	0.98 ± 0.03a	56.73 ± 1.18a	1.05 ± 0.05a	21.39 ± 8.28a
绿豆 Mung bean	0	9.01 ± 1.14a	0.91 ± 0.03d	60.90 ± 11.80b	1.00 ± 0.10a	13.92 ± 1.08a
	108	9.10 ± 0.17a	1.04 ± 0.03b	64.24 ± 2.36ab	1.12 ± 0.03a	14.52 ± 1.44a
	135	9.25 ± 0.12a	1.01 ± 0.03c	68.41 ± 1.18a	1.14 ± 0.05a	13.75 ± 2.28a
	162	9.11 ± 0.02a	1.08 ± 0.02a	61.74 ± 1.18b	1.10 ± 0.06a	17.49 ± 0.60a
大豆 Soybean	0	9.01 ± 0.12b	1.02 ± 0.01b	65.91 ± 0.00a	1.00 ± 0.03a	24.36 ± 10.08ab
	108	9.83 ± 0.62a	1.08 ± 0.03a	67.58 ± 0.00a	1.08 ± 0.08a	19.69 ± 0.36bc
	135	9.78 ± 0.51a	1.01 ± 0.02b	65.91 ± 0.00a	1.10 ± 0.06a	27.67 ± 11.40a
	162	9.87 ± 0.70a	0.98 ± 0.05c	52.56 ± 0.00b	1.01 ± 0.12a	15.87 ± 6.48c
怀豆 Huai bean	0	9.98 ± 0.17bc	1.03 ± 0.05b	68.41 ± 1.18b	1.06 ± 0.03a	21.22 ± 3.96a
	108	10.16 ± 0.28ab	1.01 ± 0.03b	60.90 ± 0.00c	1.02 ± 0.07a	17.06 ± 3.60a
	135	9.54 ± 0.20c	0.97 ± 0.01c	55.90 ± 0.00d	1.06 ± 0.05a	18.17 ± 0.60a
	162	10.61 ± 0.15a	1.07 ± 0.06a	74.25 ± 0.00a	1.12 ± 0.06a	16.89 ± 1.20a

注：表中数值为平均值 ± 标准差。不同小写字母表示同一绿肥处理下不同施氮量处理之间的差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。下同 Note: The data in the table are Mean ± SD. The different lowercase letters indicate significant difference at $p < 0.05$ level between treatments the same in green manure treatment. The same below

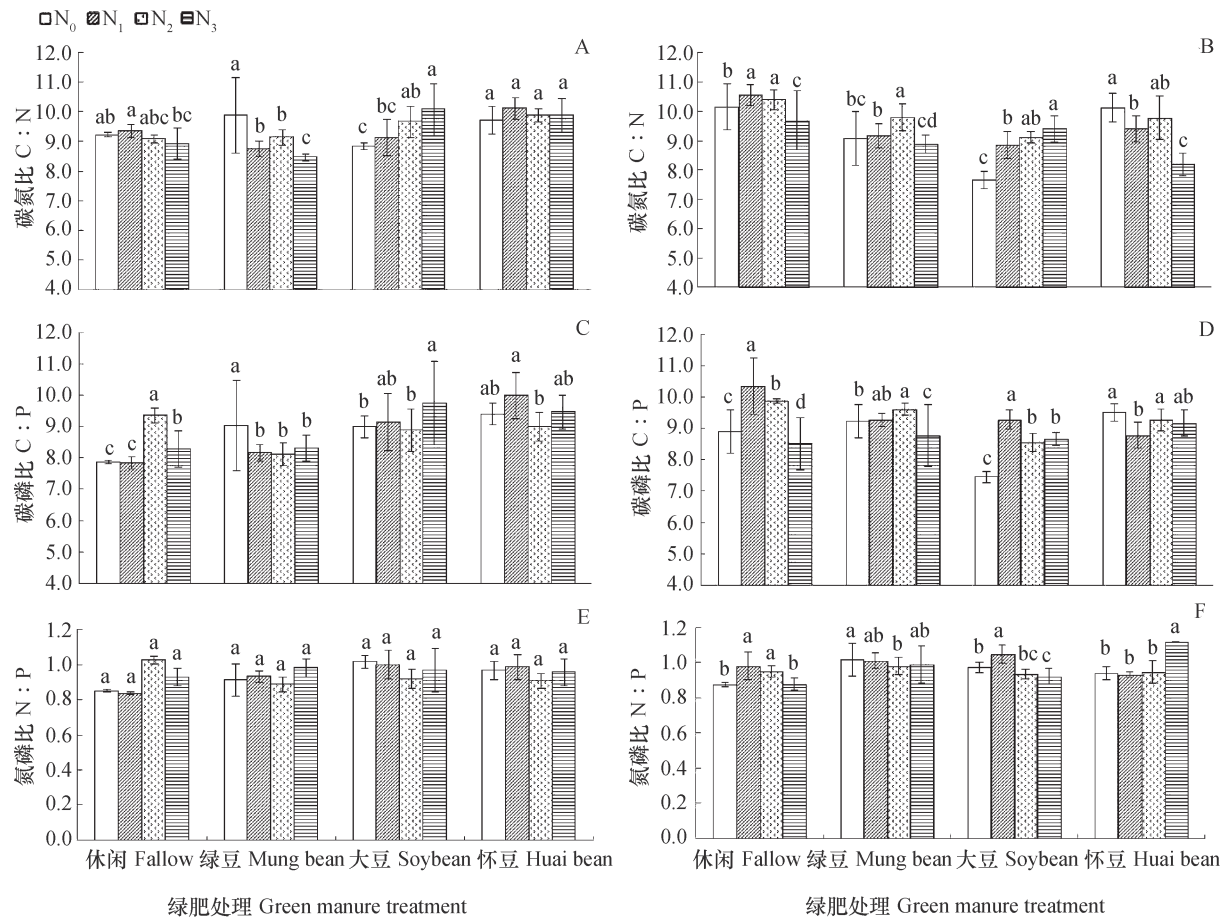
表2 绿肥翻压后土壤养分特征

Table 2 Soil nutrient status after green manure incorporation						
绿肥处理 Green manure	施氮量 N fertilizer rate (kg hm ⁻²)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N (mg kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)
休闲 Fallow	0	9.44 ± 0.72b	0.93 ± 0.01a	52.56 ± 0.00ab	1.06 ± 0.01a	28.44 ± 0.96a
	108	9.77 ± 0.32a	0.93 ± 0.01a	48.39 ± 1.18c	0.94 ± 0.08c	20.54 ± 4.92b
	135	9.89 ± 0.01a	0.95 ± 0.03a	54.23 ± 2.36a	1.00 ± 0.01b	25.30 ± 0.36a
	162	9.25 ± 0.90b	0.95 ± 0.04a	51.73 ± 1.18b	1.09 ± 0.01a	20.03 ± 0.12b
绿豆 Mung bean	0	9.48 ± 0.48c	1.04 ± 0.09c	55.06 ± 1.18c	1.03 ± 0.03c	28.01 ± 8.52b
	108	10.06 ± 0.20b	1.10 ± 0.05b	56.73 ± 1.18b	1.09 ± 0.01b	19.19 ± 3.96d
	135	10.58 ± 0.03a	1.08 ± 0.05b	60.07 ± 1.18a	1.10 ± 0.02b	23.09 ± 4.44c
	162	10.29 ± 0.35ab	1.16 ± 0.01a	60.90 ± 2.36a	1.17 ± 0.12a	37.09 ± 8.88a
大豆 Soybean	0	9.18 ± 0.22c	1.20 ± 0.04a	51.73 ± 1.18d	1.23 ± 0.00a	26.32 ± 1.08b
	108	9.94 ± 0.25ab	1.12 ± 0.05b	57.57 ± 0.00b	1.07 ± 0.02c	33.78 ± 13.08a
	135	10.28 ± 0.20a	1.13 ± 0.01b	62.57 ± 4.72a	1.20 ± 0.03a	22.58 ± 0.36b
	162	9.78 ± 0.15b	1.04 ± 0.05c	55.06 ± 1.18c	1.13 ± 0.02b	25.13 ± 5.64b
怀豆 Huai bean	0	10.65 ± 0.30a	1.05 ± 0.04c	67.58 ± 2.36a	1.12 ± 0.01b	29.37 ± 4.92b
	108	10.61 ± 0.48a	1.13 ± 0.02b	59.24 ± 0.00d	1.21 ± 0.01a	37.18 ± 5.88a
	135	10.43 ± 0.38a	1.07 ± 0.07c	61.74 ± 1.18c	1.13 ± 0.00b	33.11 ± 5.88ab
	162	10.50 ± 0.49a	1.28 ± 0.00a	65.08 ± 3.54b	1.14 ± 0.00b	32.60 ± 8.28ab

理, 怀豆(9.90)和大豆(9.43)处理显著高于休闲处理。不同施氮水平对于C:N无显著影响。绿肥翻压后, 休闲处理土壤C:N升高, C:N在9.68~10.56之间, 平均值为10.20。各绿肥处理土壤C:N的变化区间为7.65~10.12, 显著低于休闲处理, 表明, 绿肥翻压在短期时间内降低了土壤C:N, 其中大豆处理降幅最大, 达到14.22%。与N₀处理相比, 除N₃处理外, 其余各施肥处理均显著提高了土壤C:N, 其均值大小顺序为N₂(9.77)>N₁(9.49)>N₀(9.25)>N₃(9.03)。

土壤C:P变化如图1C和图1D所示。小麦收获后, 休闲处理C:P的变化范围是7.83~9.36, 平均值为8.34。绿豆处理C:P的变化范围是8.11~9.03, 平

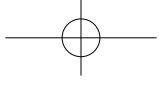
均值为8.40, 与休闲处理无显著差异。大豆与怀豆处理C:P的范围分别为8.89~9.75、8.99~9.99, 平均值分别为9.19和9.46, 显著高于休闲和绿豆处理。不同施氮水平下各处理的C:P无显著差异。翻压绿肥后, 休闲处理C:P的变化范围是8.51~10.36, 平均值为9.41。绿豆和怀豆处理C:P的变化范围分别是8.76~9.61、8.78~9.50, 平均值分别为9.22和9.18, 与休闲相比无差异。大豆处理C:P范围为7.44~9.28, 平均值为8.48, 显著低于休闲与其余两个绿肥处理。与N₀处理相比, 仅有N₁和N₂处理显著提高了土壤C:P, 均值大小顺序是N₁(9.42)>N₂(9.32)>N₃(8.78)≈N₀(8.77)。



注: 图中A、C、E为小麦收获后碳氮磷比值, B、D、F为绿肥翻压后碳氮磷比值。N₀、N₁、N₂、N₃分别代表施氮水平为0 kg hm⁻²、108 kg hm⁻²、135 kg hm⁻²、162 kg hm⁻²的处理。不同小写字母表示同一绿肥处理不同施氮量处理之间差异显著 ($p < 0.05$) Note: A, C and E stands for ratio of C, N and P, respectively, after wheat was harvest; B, D and F for ratio of C, N and P, respectively, after green manure crops were incorporated; and N₀, N₁, N₂ and N₃ for treatment 0 kg hm⁻², 108 kg hm⁻², 135 kg hm⁻² and 162 kg hm⁻², respectively, in nitrogen fertilizer application rate. The different lowercase letters indicate significant difference at $p < 0.05$ level between treatments the same in green manure treatment

图1 不同绿肥及施氮水平下土壤碳氮磷比

Fig. 1 Ratios of soil C, N and P as affected by green manure crop cultivated and incorporated and nitrogen application rate



土壤N:P变化如图1E和图1F所示。小麦收获后,休闲处理土壤N:P的范围是0.84~1.03,平均值为0.91。各绿肥处理土壤N:P在0.89~1.02之间波动,绿豆、大豆与怀豆处理N:P均值分别为0.93、0.98和0.96,各绿肥处理间无明显差异,与休闲处理相比也无显著差异。不同施氮水平对于N:P无显著影响。绿肥翻压后,休闲处理N:P的变化范围是0.88~0.98,平均值为0.92,与翻压前无明显变化。绿豆、大豆与怀豆处理N:P的范围分别是0.98~1.02、0.92~1.05、0.93~1.12,平均值分别为1.00、0.97、0.99,均显著高于休闲处理,表明,翻压豆科绿肥在短期内能够提高土壤N:P。与 N_0 处理相比, N_1 和 N_3 处理显著提高了土壤N:P,其均值大小顺序为 $N_1(0.99) > N_3(0.98) > N_2(0.95) \approx N_0(0.95)$ 。

3 讨 论

3.1 夏闲期种植翻压豆科绿肥对土壤养分特征的影响

本研究发现,绿肥处理的土壤养分含量显著高于休闲处理($p < 0.05$),这说明绿肥翻压处理有较好的培肥土壤后效。在不施氮肥的情况下(N_0 处理),夏闲期连续6年豆科绿肥翻压后(小麦收获后),土壤有机碳、全氮和碱解氮含量分别提高了2.27%~13.28%、-4.22%~8.42%、1.38%~13.88%(表1)。可见,有机碳的提升幅度大于全氮。在施氮肥的情况下,绿肥处理土壤有机碳、全氮和碱解氮等养分相对于休闲处理均有不同程度提高。相比于翻压前,绿肥翻压后短期内(2周后)的土壤有机碳、全氮、全磷和有效磷含量分别增加了1.87%~10.75%、8.91%~10.78%、0.92%~10.48%、23.06%~80.32%,碱解氮含量降低了2.25%~9.94%,但各指标仍显著高于休闲处理(表2)。李红燕等^[22]、彭映平等^[23]以及张达斌等^[4]的研究也显示翻压豆科或非豆科绿肥均能显著提高渭北旱塬土壤有机质、全氮、矿质态氮与有效磷含量。高菊生等^[24]发现,双季稻-绿肥轮作26年后,相对于休闲处理,豆科绿肥和非豆科绿肥均显著提高了土壤有机碳和全氮含量。其中,非豆科绿肥对于有机碳的提升效果更为明显,而豆科绿肥促进全氮含量升高的作用更加显著。白金顺等^[25]研究发现,稻田种植翻压绿肥能够降低耕层

土壤无机氮损失,为后季水稻生长提供更多养分。

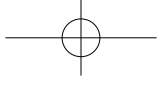
长武怀豆是当地广泛种植的绿肥作物,根瘤丰富,植株含氮量高^[26]。无论是在小麦收获后还是在绿肥翻压后,怀豆处理对于土壤有机碳、全氮和碱解氮含量的提升效果均最佳。对于全磷和有效磷而言,尽管怀豆处理与大豆和绿豆处理无显著差异,但是与休闲处理相比,绿肥翻压(2周后)仍显著增加了二者的含量。

综上所述,相对于休闲处理,种植并翻压豆科绿肥能显著改善土壤养分特征,同时,三种豆科绿肥处理的效果存在差异,以怀豆的培肥效果最为明显。

3.2 土壤碳氮磷生态化学计量学特征对绿肥翻压的响应

土壤生态化学计量特征与土壤植被类型、管理方式等有关,是反映土壤质量变化的重要指标^[27]。单从营养元素的总量变化无法准确判断养分平衡状态,而土壤养分的动态平衡是保证土壤可持续发展和丰产的重要前提。本文尝试用生态化学计量学这一理论探究种植翻压绿肥前后土壤的养分平衡状态,进一步剖析种植并翻压绿肥后土壤质量的变化。

土壤C:N反映了碳和氮之间的平衡关系,其演变趋势对土壤肥力以及碳、氮循环有重要的影响。具体而言,低C:N会加快土壤氮的矿化速率,而高C:N时微生物同化量则会超过矿化作用所提供有效氮的量,造成植物缺氮。本研究表明,渭北旱塬区土壤C:N较低,在8~10之间,与黄土高原草地土壤C:N相当^[28],低于森林土壤及湿地土壤C:N^[10, 13],且低于我国土壤C:N均值10~12^[29],说明渭北旱塬区土壤有机质含量整体较低。夏闲期多年翻压绿肥(小麦收获后),大豆和怀豆的C:N显著高于休闲处理,绿豆处理的C:N与休闲处理的差异不显著,说明,长期种植并翻压绿肥有利于有机质的形成与土壤质量的提高。王峥等^[30]的研究显示,对于怀豆而言,不同播前施肥和不同翻压方式处理的C:N(7.88~8.41)均高于休闲处理(7.82)。绿肥短期翻压(2周)后,休闲和绿豆处理的C:N较之前有所增加,大豆和怀豆处理的C:N则呈现降低的趋势,并且三种绿肥的C:N均显著低于休闲处理。翻压豆科绿肥短期内在提高土壤有机碳、全氮含量的同时,土壤C:N较休闲处理降低,这是因为大量绿肥秸秆进入土壤,在微生物的分解作用



下, 土壤累积的氮素高于土壤累积有机碳。随着时间延长, 植物和微生物对氮的需求增加, 氮的矿化加快, 造成土壤C:N升高。

小麦收获后, 绿肥处理(除绿豆外)土壤C:P显著高于休闲处理。这与C:N的变化趋势相同, 表明, 经过6年的夏闲期绿肥一冬小麦轮作后, 绿肥处理有机碳含量增加的幅度大于全氮与全磷积累的幅度, 绿肥种植与翻压措施加速了土壤中有机质的形成。而各绿肥处理与施氮处理的土壤全磷含量均无显著差异, 说明从长期来看, 土壤有机碳含量在C:P的变化中占主导地位。绿肥短期翻压(2周)后, 大豆处理土壤C:P均显著低于其他处理。这是因为大豆植株含磷量较高^[26], 在绿肥翻压后, 大豆处理土壤全磷含量最高, 而有机碳含量低于怀豆和绿豆处理。与森林、草地、湿地等生态系统相比, 渭北旱塬地区土壤C:P明显较小^[10-13], 这也说明了研究区土壤有机碳含量较低, 磷元素充足。

长期翻压绿肥(指在小麦收获后下季绿肥种植前, 这时的土壤样品中绿肥秸秆经过近一年的腐解, 且是连续多年夏闲期翻压绿肥效应的叠加, 可作为翻压绿肥的长期效应)土壤与休闲处理土壤N:P无显著差异, 而绿肥翻压短期内(2周)各处理相对于翻压前, 其N:P均有所增大, 并且三种绿肥的N:P均显著高于休闲处理。这是因为, 豆科绿肥能够进行生物固氮作用, 增加土壤中氮含量, 而土壤磷的来源较单一, 并且在土壤中分布较均匀, 导致翻压豆科绿肥后短期内土壤N:P增大。但是从长期定位试验结果来看, 各绿肥处理土壤N:P与休闲处理并无明显差异, 说明该地区土壤氮素循环较快。N:P是土壤养分限制的重要指标。本试验结果显示, 渭北旱塬区土壤N:P较低, 远小于我国土壤N:P均值, 说明磷并不是该地区的限制元素。

综合来看, 试验地土壤C:N、C:P以及N:P比值均较低, 这是因为研究区土壤有机碳、全氮含量较低, 而全磷含量相对较高的缘故。土壤碳和氮是该地区土壤养分的限制元素。在培肥土壤的过程中, 不仅要关注碳、氮、磷总量的动态变化, 还要重视营养元素的平衡状态尤其是C:N。农业生产实践中, 在保证氮素供应的条件下, 应该重视有机物料的投入, 如大力推广秸秆还田和增施有机肥等, 以保持土壤碳氮的平衡。夏闲期种植和翻压绿

肥, 并配合肥料施用是黄土高原旱塬区一种有效的土壤培肥措施。

4 结 论

夏闲期种植并翻压豆科绿肥显著提高了土壤有机碳、全氮和碱解氮等养分含量, 能达到培肥土壤的效果, 其中, 怀豆的培肥效果最为明显。翻压绿肥后, 短期内土壤C:N降低, 但从长期效应来看, 翻压绿肥提高了土壤C:N, 有利于土壤有机质的积累, 对土壤养分状况的改善具有重要作用。种植和翻压绿肥是渭北旱塬地区土壤培肥的有效措施。

参 考 文 献

- [1] 李军, 王立祥. 渭北旱塬夏闲地开发利用研究. 西北农业大学学报, 1994, 22(2): 99—102
Li J, Wang L X. The exploitation and utilization of summer fallow lands on Weibei rainfed highland (In Chinese). Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis, 1994, 22(2): 99—102
- [2] 黄东风, 王利民, 李卫华, 等. 培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 127—135
Huang D F, Wang L M, Li W H, et al. Research progress on the effect and mechanism of fertilization measure on soil fertility (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(2): 127—135
- [3] 刘芬, 王小英, 赵业婷, 等. 渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡研究. 农业机械学报, 2015, 46(2): 110—119
Liu F, Wang X Y, Zhao Y T, et al. Spatial and temporal variation of soil nutrient and nutrient balance status in Weibei rainfed highland (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 110—119
- [4] 张达斌, 姚鹏伟, 李婧, 等. 豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响. 生态学报, 2013, 33(7): 2272—2281
Zhang D B, Yao P W, Li J, et al. Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2272—2281
- [5] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考. 中国土壤与肥料, 2009(4): 1—3
Cao W D, Huang H X. Ideas on restoration and

- development of green manures in China (In Chinese). Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009 (4): 1—3
- [6] Ding X, Yuan Y, Liang Y, et al. Impact of long-term application of manure, crop residue, and mineral fertilizer on organic carbon pools and crop yields in a Mollisol. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14 (5): 854—859
- [7] Weller D M, Raaijmakers J M, Gardener B B M S, et al. Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. Annual Review of Phytopathology, 2002, 40 (1): 309—348
- [8] Kirkegaard J, Christen O, Krupinsky J, et al. Break crop benefits in temperate wheat production. Field Crops Research, 2008, 107 (3): 185—195
- [9] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005, 29 (6): 1007—1019
Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems (In Chinese). Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29 (6): 1007—1019
- [10] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征. 土壤学报, 2017, 54 (1): 160—170
Li D W, Wang Z Q, Tian H X, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (1): 160—170
- [11] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 土壤学报, 2016, 53 (2): 477—489
Zhao W J, Liu X D, Jin M, et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (2): 477—489
- [12] 马任甜, 方瑛, 安韶山. 云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷生态化学计量特征. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1170—1180
Ma R T, Fang Y, An S S. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, phosphorus and C:N:P in shoots and litter of plants in grassland in Yunwu Mountain (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (5): 1170—1180
- [13] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 等. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1160—1169
Zhang Z S, Lü X G, Xue Z S, et al. Is there a Redfield-type C:N:P ratio in Chinese wetland soils? (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (5): 1160—1169
- [14] 杨军伟, 王昌全, 曾庆宾, 等. 攀枝花市米易县植烟土壤生态化学计量学特征研究. 中国农学通报, 2016, 32 (17): 111—114
Yang J W, Wang C Q, Zeng Q B, et al. Ecological stoichiometry characteristics of tobacco planting soil in Miyi, Panzhihua (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32 (17): 111—114
- [15] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对西南黄壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响. 土壤通报, 2016, 47 (3): 673—680
Zhang Y R, Li Y, Liu Y L, et al. Effect of long-term fertilization on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in southwest yellow soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47 (3): 673—680
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [17] 苗淑杰, 周连仁, 乔云发, 等. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响. 土壤学报, 2009, 46 (6): 1068—1075
Miao S J, Zhou L R, Qiao Y F, et al. Organic carbon mineralization and carbon contribution in aggregates as affected by long-term fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (6): 1068—1075
- [18] 李菊梅, 王朝辉, 李生秀. 有机质, 全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义. 土壤学报, 2003, 40 (2): 232—238
Li J M, Wang Z H, Li S X. Significance of soil organic matter, total N and mineralizable nitrogen in reflecting soil N supplying capacity (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (2): 232—238
- [19] 曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和 Olsen-P 的变化. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (1): 90—98
Qu J F, Li J M, Xu M G, et al. Total-P and Olsen-P dynamics of long-term experiment without fertilization (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14 (1): 90—98
- [20] 杜臻杰, 陈效民, 张佳宝, 等. 不同施肥处理下红壤旱地速效磷时空变化及其影响因子. 南京农业大学学报, 2009, 32 (4): 112—115
Du Z J, Chen X M, Zhang J B, et al. Time-spatial variability and influenced factors of available phosphorus under different fertilizer treatments in dry land of red soil (In Chinese). Journal of Nanjing

- Agricultural University, 2009, 32 (4) : 112—115
- [21] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98 (1) : 139—151
- [22] 李红燕, 胡铁成, 曹群虎, 等. 旱地不同绿肥品种和种植方式提高旱地土壤肥力效果. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (5) : 1310—1318
- Li H Y, Hu T C, Cao Q H, et al. Effect of improving soil fertility by planting different green manures in different patterns in dryland (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (5) : 1310—1318
- [23] 彭映平, 和文祥, 王紫泉, 等. 黄土高原旱区绿肥定位试验土壤化学性质及酶活性特征研究. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2015, 43 (9) : 131—138
- Peng Y P, He W X, Wang Z Q, et al. Soil chemical properties and enzyme activities in long-term green manure plot in Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43 (9) : 131—138
- [24] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响. *生态学报*, 2011, 31 (16) : 4542—4548
- Gao J S, Cao W D, Li D C, et al. Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (16) : 4542—4548
- [25] 白金顺, 曹卫东, 樊媛媛, 等. 苏南稻田4种冬绿肥养分特性及对翻压前土壤无机氮的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (2) : 413—419
- Bai J S, Cao W D, Fan Y Y, et al. Nutrient characteristics of four kinds of winter green manure and their influences on soil mineral nitrogen before incorporation (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19 (2) : 413—419
- [26] 赵娜, 赵护兵, 曹群虎, 等. 渭北旱区夏闲期豆科绿肥对土壤肥力性状的影响. *干旱地区农业研究*, 2011, 29 (2) : 124—128
- Zhao N, Zhao H B, Cao Q H, et al. Effect of green manure on soil fertility properties in summer fallow period in Weibei dryland (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29 (2) : 124—128
- [27] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征. *环境科学*, 2011, 32 (5) : 1407—1414
- Zhang C H, Wang Z M, Ju W M, et al. Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain Maize Belt (In Chinese). *Environmental Science*, 2011, 32 (5) : 1407—1414
- [28] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征. *土壤学报*, 2016, 53 (6) : 1541—1551
- Zhao X D, Zeng Q C, An S S, et al. Ecological stoichiometric characteristics of grassland soils and plant roots relative to enclosure history on the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (6) : 1541—1551
- [29] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Huang C Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [30] 王峥, 梁颖, 姚鹏伟, 等. 绿肥播前施肥和翻压方式对旱地麦田土壤水肥性状的影响. *干旱地区农业研究*, 2014, 32 (3) : 119—126
- Wang Z, Liang Y, Yao P W, et al. Effects of fertilization before sowing of leguminous green manure and its incorporation methods on soil moisture and nutrient regime of wheat field in Weibei dryland (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32 (3) : 119—126

Effects of Leguminous Green Manure on Soil Nutrients and Their Ecological Stoichiometry Characteristics in Weibei Rainfed Highland

DU Wei¹ WANG Ziquan¹ HE Wenxiang^{1, 2†} GAO Yajun^{1, 2} CAO Weidong³

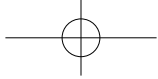
(1 College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract 【Objective】As an important agro-ecological region, the Weibei rainfed highland needs urgently measures to build up its soil fertility and improve its eco-environment because of its infertile soil

<http://pedologica.issas.ac.cn>



and severe soil erosion. High in stress tolerance, leguminous green manure crops grow normally in severe ecological environment. Cultivation and incorporation of such crops may help reduce soil erosion as well as improving soil structure and soil fertility. 【Method】 In order to explore rules of changes in farmland soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics as affected by cultivation and incorporation of green manure crops in summer fallow seasons, a field experiment was designed to have three different species of leguminous green manure crops [Mung bean (*Phaseolus radiatus* L.) , soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and Huai bean (*Glycine ussuriensis* Regel et Maack)] , four nitrogen fertilization rates (N_0 , 0 kg N hm^{-2} ; N_1 , 108 kg N hm^{-2} ; N_2 , 135 kg N hm^{-2} and N_3 , 162 kg N hm^{-2}) and three replicates for each treatment, laid out in a split plot design in a tract of farmland in the Weibei Rainfed Highland, and conducted for six years in a row. Soil samples were collected at the end of the experiment from each treatment for analysis of nutrient contents and eco-stoichiometric ratios of C : N, C : P and N : P. 【Result】 Results show that the long-term cultivation and incorporation of leguminous green manure crops improved soil organic carbon, total nitrogen, alkaline nitrogen contents significantly or by 4.47% ~ 15.35%, 5.21% ~ 6.25% and 11.00% ~ 14.35%, respectively, as compared to CK (the fallow treatment) , and the effects of Huai bean were the most obvious in all the treatments. Two weeks after the incorporation of green manure crops, soil total nitrogen, soil organic matter and alkaline nitrogen all increased in content, but the margin of the increase of the former was higher than that of the latter two. In the treatments with Huai bean, organic carbon, total nitrogen, alkaline nitrogen, total phosphorus and available phosphorus all increased significantly, either in a short term or a long term, indicating that the effect of the green manure crop of Huai bean on soil building is the most obvious. Huai bean, high in number of root nodules and in nitrogen content, is a crop widely cultivated in the local area. After the incorporation of a green manure crop into the soil, soil C : N declined for the first short period of time, but in the long run, soil C : N was increased, which is beneficial to the accumulation of soil organic matter and improvement of soil nutrient balance. The ratios of C : N, C : P and N : P in the experiment field are all quite low, because the soil is low in soil organic carbon and total nitrogen, but high in total phosphorus. Soil carbon and nitrogen are the two limiting soil nutrient elements in this region. In the process of improving soil fertility, it is essential to focus not only on dynamic changes of total carbon, nitrogen, phosphorus but also on nutrient balance, especially C : N. In the practice of agricultural production, it is a must to ensure soil N supply, and in addition, enough attention to input of organic materials in such ways as incorporating crop straw into soil and expanding application of organic manure, so as to maintain the balance of soil carbon and nitrogen. 【Conclusion】 Soil C : P and N : P is closely related to dynamics of soil carbon and nitrogen contents. Cultivation and incorporation of green manure crops in the summer fallow period significantly improves soil carbon and nitrogen status, and hence is an effective practice to build up soil fertility in the Weibei rainfed highland.

Key words Weibei rainfed highland; Green manure; C : N; C : P; N : P

(责任编辑: 陈荣府)