

秸秆还田方式对土壤理化性质的综合影响评价

陈昊, 饶继翔, 孙庆业*

(安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601)

摘要: 为了探究适合于砂姜黑土地地区麦玉轮作模式下的秸秆还田方式, 在增加养分的同时减少养分流失风险。设置 7 种秸秆还田处理方式: A (小麦秸秆全还田, 玉米秸秆不还田)、B (玉米秸秆全还田, 小麦秸秆不还田)、C (小麦玉米秸秆全还田)、D (施肥但秸秆不还田 CK1)、E (小麦秸秆半还田, 玉米秸秆不还田)、F (玉米秸秆半还田, 小麦秸秆不还田) 和 G (秸秆不还田也不施肥 CK2)。对不同处理土壤进行理化分析, 同时运用熵权法对土壤进行质量评价, 以及对土壤中有潜在流失风险的养分进行评估。结果表明: 与不还田也不施肥的对照相比, 在 0~20 cm 土层中, 除 C 处理外均可提升土壤含水率, 分别提升了 66.9%、50.1%、31.1%、51.2% 和 77.2%; 不同处理土壤中微生物量氮、全氮、硝氮和总磷含量依次是: $G < D < E < F < B < A < C$, 土壤有机碳含量与秸秆还田量有关, 含量大小依次是 $G < D < E < F < A < B < C$ 。养分评价得分中, 养分增加效果 $C > B > A > F > E > D > G$, 各秸秆还田处理养分流失风险依次是 $E > F > C > A > B$ 。综合考虑养分增加与流失风险, 在各处理中小麦玉米秸秆全量还田处理 C 是一种能够在增加养分的基础上降低潜在面源污染风险的还田方式。

关键词: 秸秆还田; 含水率; 土壤养分; 养分流失; 熵权法; 综合评价

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)04-0661-07

Comprehensive evaluation of effects of straw returning methods on soil physical and chemical properties

CEHN Hao, RAO Jixiang, SUN Qingye

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601)

Abstract: To explore the straw returning mode which is suitable for wheat-jade rotation in Shajiang black soil area, it can increase nutrients and reduce risk of nutrient loss at the same time. Set up seven straw returning treatment methods: A (wheat straw returning to the field, corn straw not returning to the field), B (corn straw returning to the field, wheat straw not returning to the field), C (wheat straw returning to the field), D (fertilizing but not returning wheat straw to the field), E (wheat straw half returning to the field, corn straw not returning to the field), F (corn straw half returning to the field, wheat straw not returning to the field), G (wheat straw not returning to the field and not fertilizing CK2). Carry on the physical and chemical analysis to the soil of different treatments, at the same time, use the entropy method to evaluate the soil quality, and evaluate the nutrients with potential loss risk in the soil. The results showed that compared with the control without returning or applying fertilizer, in the 0-20 cm soil layer, except for C treatment, the soil moisture content can be increased by 66.9%, 50.1%, 31.1%, 51.2%, and 77.2% respectively; the soil microbial biomass nitrogen, total nitrogen, and nitrate in different treatments The order of nitrogen and total phosphorus content is: $G < D < E < F < B < A < C$, the organic carbon content in the soil is related to the amount of straw returned to the field, and the order of content is $G < D < E < F < A < B < C$. In the nutrient evaluation score, the effect of nutrient increase is $C > B > A > F > E > D > G$, and the nutrient loss risk of each straw return treatment is $E > F > C > A > B$. Taking into account the risks of nutrient increase and loss, in each treatment, the full return of wheat and corn stalks to the field treatment C is a way of returning to the field that can reduce the risk of potential non-point source pollution on the basis of increasing nutrients.

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0800301-01)资助。

作者简介: 陈昊, 硕士研究生。E-mail: 1208425450@qq.com

* 通信作者: 孙庆业, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: sunqingye@ahu.edu.cn

Key words: straw returning; moisture content; soil nutrient; nutrient loss; entropy weight method; comprehensive evaluation

农作物秸秆作为一种重要的生物质资源, 具有重要的养分价值, 不但含有丰富的氮、磷、钾及部分微量元素, 还含有丰富的木质素和纤维素^[1]。农业农村部发布的数据显示, 我国每年产出大约 7 亿 t 秸秆^[2], 其中水稻、小麦和玉米 3 种粮食作物秸秆产量最高, 可达 5 亿 t, 分别占到总产量的 29.0%、19.9%和 37.5%^[3]。这些秸秆资源若不能被有效合理地利用, 将占用大量土地资源。

农作物秸秆还田对土壤容重和孔隙度产生影响。马永良等^[4]通过研究表明, 秸秆还田可以使 0~20 cm 耕作层土壤容重降低 0.17~0.25 g·cm⁻³; 同时秸秆还田增加土壤总孔隙度和毛管孔隙度, 改善土壤结构, 抑制土壤板结, 对退化土壤有一定的修复能力^[5]。秸秆残体施入后可以提高土壤孔隙度, 减少水分的蒸发, 增强土壤水分入渗能力从而增加土壤含水量^[6]。秸秆还田不仅可以改善土壤的物理性状, 还可以减少土壤养分流失, 增加土壤肥力, 改善土壤质量^[7]。秸秆还田后, 增加了土壤有机质的积累, 为微生物的活动提供了能源, 提高了微生物的种类和数量^[8]; 同时秸秆腐解产生的大量的 N、P 和 K, 又可以为作物提供养分^[9], 秸秆还田减少了焚烧污染, 保护了大气环境^[10]。但是秸秆还田增加土壤养分元素的同时可能会导致潜在面源污染。现有关于秸秆还田研究有很多, 主要是针对还田量和还田方式对土壤物理性质、土壤养分、土壤微生物和土壤酶活, 说明秸秆还田对土壤的影响因秸秆种类、数量、温度和水分等多种情况而有所不同, 但是以往的研究往往只针对一季作物秸秆还田, 对于砂姜黑土地地区小麦-玉米轮作模式下两季作物秸秆均还田对土壤的影响缺少系统性的研究。

为此, 本试验在砂姜黑土地地区麦玉轮作模式下开展大田试验, 在小麦季和玉米季均进行秸秆还田, 并设置了不同的秸秆还田量, 研究其对土壤养分的影响, 确定在当前习惯性施肥下最适合的秸秆还田量, 为麦玉轮作砂姜黑土地地区提供科学依据, 以期找到一种既可以提高土壤肥力, 又可以减少潜在面源污染, 促进农业可持续发展的还田方式。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

研究区为安徽省宿州市埇桥区的宿州市农科院的试验田, 该区域属暖温带半湿润季风气候, 四季

分明, 光照充分, 雨量适中, 雨量多集中于夏秋季, 年平均气温 15.7 °C, 无霜期约 210 d。土壤土质为砂姜黑土, 试验田主要耕作方式为小麦-玉米轮作, 宿州市年平均降水量在 774~896.3 mm。

表 1 不同秸秆还田方式的处理

Table 1 Treatment of different straw returning methods

组别	处理方式
A	小麦秸秆全部还田, 玉米秸秆不还田 施肥
B	玉米秸秆全部还田, 小麦秸秆不还田 施肥
C	小麦玉米秸秆全部还田 施肥
D	施肥但秸秆不还田 (CK1)
E	小麦秸秆 50%还田, 玉米秸秆不还田 施肥
F	玉米秸秆 50%还田, 小麦秸秆不还田 施肥
G	秸秆不还田也不施肥 (CK2)

每个处理设计 4 个重复, 每个种植小区面积相同, 长 15 m, 宽 8 m。本试验采用旋耕机进行旋耕还田, 将田里秸秆全部清除后进行测算后再进行返田。秸秆还田量分别为小麦秸秆全还田 (114.31 kg), 玉米秸秆全还田 (122.03 kg), 小麦秸秆 50%还田 (57.15 kg), 玉米秸秆 50%还田 (61.02 kg)。设定为设置 7 个处理 (见表 1) 每个处理 4 个重复进行试验探讨其中地下铺设地膜以防止深处土层对耕作土壤的影响。小麦播种行距 20 cm, 播种量为 165 kg·hm⁻²。播种玉米行距 60 cm, 播量为 45 kg·hm⁻²。小麦季施肥: 尿素 585 kg·hm⁻²、过磷酸钙 750 kg·hm⁻²、氯化钾 150 kg·hm⁻²; 玉米季施肥: 配方 25-12-8 复合肥 540 kg·hm⁻² 氯化钾 82.5 kg·hm⁻² 过磷酸钙 465 kg·hm⁻²。施肥为施肥总量进行一次性施肥, 除 G 处理外, 其余处理均在相同时间施相同量肥料。

供试品种小麦季选用国审小麦新品种宿 553, 2017 年 10 月 23 日播种; 玉米季选用大穗型玉米新品种隆平 206, 2018 年 6 月 20 日播种, 连续 2 年实施, 自 2017 年到 2019 年, 每年实施日期有细微差别。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与预处理 2019 年 3 月用土钻采集各试验小区 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土样, 每试验小区采集 5 份土壤亚样本混匀为 1 个土壤样本, 采样之前将地面的作物以及凋落物去除。所采集的土壤样品带回实验室分成两部分, 一部分冷冻储存, 另一部分于室内自然风干, 研磨后过 20

目和 100 目筛后用于土壤理化性质分析。

1.2.2 土壤理化性质的测定 采用单因素方差分析土壤理化性质的测定参照《土壤农化分析》^[11]。土壤含水量采用烘干法测定,土壤总氮采用凯氏定氮法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾湿氧化法。土壤中的铵氮采用靛酚蓝比色法,硝氮采用紫外分光光度法。微生物量氮采用熏蒸法测定^[12]。

方差分析和 Duncan 法检验不同秸秆还田处理后土壤养分之间的差异 ($P<0.05$)。借助 SPSS15 进行数据处理,图表中数据为平均值 \pm 标准差。

1.3 指标筛选方法

1.3.1 指标的选取 选取能反应土壤理化性质的含水量、有机碳、全氮、铵氮、硝氮、微生物量氮、速效磷和全磷作为候选指标。

1.3.2 指标筛选方法 对指标的独立性进行分析,将待筛选指标进行正态分布检验,符合正态分布检验的候选指标进行 Person 相关性分析,不符合正态分布的采用 Spearman 秩相关分析,采用统计学分析和主观判断相结合的原则,选取相对独立和重要的指标作为评价指标。

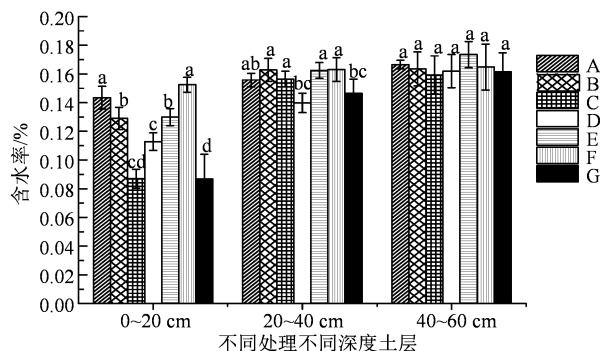
1.3.3 评价方法 利用熵权法对不同处理后的土壤养分进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田处理下对各深度土壤含水量影响

不同处理不同土层间含水量变化极大。如图 1 所示同一处理下,土层越深含水量越高,从 0~20 cm 土层到 40~60 cm 土层,含水量依次增加。0~

20 cm 土层含水量变化显著,其中含量最低为处理 G,仅为 8.6%,含水量最高为处理 F,达到 15.25%,秸秆还田对含水量有显著影响。



图中不同标记代表不同处理。不同小写字母表示差异项显著 ($P<0.05$),下同。

图 1 不同秸秆还田处理对各深度土壤含水率的影响

Figure 1 Effects of different straw returning treatments on soil moisture content at different depths

2.2 不同秸秆还田处理对各深度土壤有机碳影响

通过图 2 可以明显看出 0~40 cm 土层各处理土壤有机碳含量均比处理 G 高,说明秸秆还田对土壤有机碳有显著影响。处理 C 土壤有机碳含量最高,达到 6.51%,比对照 G 增加 33.03%~60.23%。0~20 cm 土层中,各处理土壤有机碳含量按从小到大排序依次是: G<D<E<F<A<B<C,土壤有机碳有随着秸秆还田量的增加而增加的趋势。同一处理中随着土层深度增加土壤有机碳含量下降。

表 2 不同秸秆还田处理对不同深度土壤氮素的影响

Table 2 Effects of different straw returning treatments on soil nitrogen at different depths

项目	土壤深度/cm	处理编号						
		A	B	C	D	E	F	G
总氮/(mg·kg ⁻¹)	0~20	825.93±16.55 ^b	848.49±20.08 ^a	883.63±41.09 ^a	666.68±75.45 ^c	684.44±15.86 ^c	702.94±10.39 ^c	463.24±26.46 ^d
	20~40	470.21±20.87 ^{bc}	479.44±10.51 ^b	528.79±22.52 ^a	399.01±12.27 ^d	459.12±22.78 ^{bc}	446.82±11.88 ^c	346.71±10.22 ^c
	40~60	362.13±11.69 ^a	363.90±27.77 ^a	363.91±9.96 ^a	358.87±12.60 ^a	297.81±12.53 ^b	294.47±31.04 ^b	274.69±16.99 ^b
铵氮/(mg·kg ⁻¹)	0~20	4.562±0.36 ^{ab}	4.112±0.76 ^a	3.862±0.38 ^a	4.132±0.59 ^a	5.575±1.41 ^b	4.727±0.50 ^{ab}	5.697±0.49 ^b
	20~40	5.275±0.42 ^b	5.162±0.64 ^b	4.562±0.32 ^{ab}	4.775±0.93 ^a	5.261±0.39 ^b	4.411±0.45 ^{ab}	4.135±0.21 ^a
	40~60	2.411±0.53 ^{bc}	1.972±0.94 ^{abc}	2.777±0.31 ^c	1.651±0.23 ^{ab}	4.947±0.82 ^d	1.602±0.47 ^{ab}	1.321±0.16 ^a
硝氮/(mg·kg ⁻¹)	0~20	7.55±0.12 ^a	7.72±0.35 ^a	8.07±0.19 ^a	4.31±0.67 ^c	4.26±0.11 ^c	4.83±0.45 ^b	2.81±0.42 ^d
	20~40	3.94±0.16 ^b	3.94±0.41 ^b	6.48±0.34 ^a	2.63±1.05 ^c	2.67±0.32 ^c	2.64±1.27 ^c	3.95±0.77 ^b
	40~60	3.78±0.57 ^{ab}	3.86±0.64 ^{ab}	4.13±0.32 ^a	3.34±0.32 ^{ab}	3.92±0.56 ^a	3.72±1.03 ^{ab}	2.86±0.43 ^b

注:表中不同小写字母表示差异项显著 ($P<0.05$)。下同。

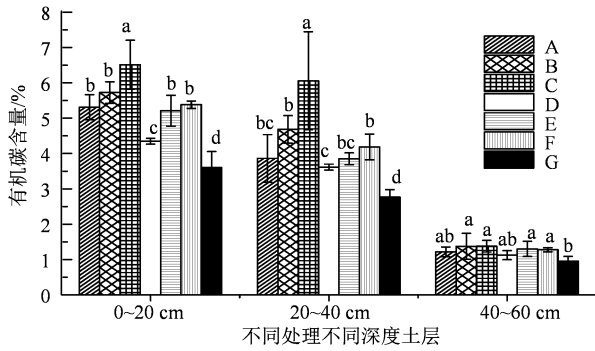


图 2 不同秸秆还田处理对各深度土壤有机碳的影响
Figure 2 Effects of different straw returning treatments on soil organic carbon at different depths

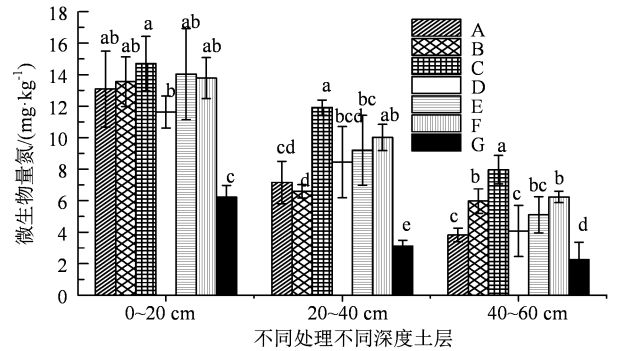


图 3 不同秸秆还田处理对各深度土壤微生物量氮的影响
Figure 3 Effects of different straw returning treatments on soil microbial biomass nitrogen at different depth

2.3 不同秸秆还田方式对各深度土壤氮素影响

通过比较不同处理和不同深度土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量变化后发现, 各处理间氮素水平各不相同(表 2)。秸秆还田对土壤氮素含量影响显著, 处理 C 土壤总氮含量最高, 且与其他处理达到显著差异, A、B、C、E 和 F 处理下全氮含量分别增加了 78.29%、83.16%、90.74%、47.74%和 51.74%, 铵态氮降低, 硝态氮增加, 并且这种增加与还田秸秆量有关, 小麦玉米秸秆全量还田增加总氮效果最好。

2.4 不同的秸秆还田方式对各深度土壤微生物量氮的影响

根据图 3 得到结果显示, 在 0~60 cm 整体土层中, 与处理 G 相比, 其余处理下微生物氮含量均呈增加趋势, 差异达到显著水平, 秸秆还田对土壤微生物有影响, 其中 0~20 cm 土层处理 C 的微生物氮含量最高, 为 14.71 mg·kg⁻¹, 相较于对照处理 G 增加了 128.41%。在 0~20 cm 土层中, 微生物量氮含量从低到高依次是 G<D<E<F<B<A<C。

表 3 不同秸秆还田方式对各深度土壤全磷和速效磷的影响

Table 3 Effects of different straw returning methods on soil total phosphorus and available phosphorus in different depth

项目	深度/cm	处理编号						
		A	B	C	D	E	F	G
全磷/(mg·kg ⁻¹)	0~20	735.471±33.05 ^{bc}	757.971±17.61 ^a	830.872±32.34 ^a	692.973±18.24 ^c	702.685±15.44 ^c	721.162±18.63 ^{bc}	658.618±47.01 ^d
	20~40	373.832±37.29 ^{bc}	411.273±14.67 ^{ab}	441.819±29.38 ^a	344.657±13.11 ^c	369.535±7.01 ^{bc}	391.823±39.69 ^b	309.245±29.61 ^d
	40~60	334.664±35.11 ^a	326.687±18.01 ^a	356.221±23.81 ^a	319.555±19.11 ^a	347.561±31.71 ^a	327.983±21.45 ^a	277.427±42.14 ^b
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	0~20	17.483±2.77 ^d	14.984±3.33 ^d	12.378±1.72 ^c	8.4509±1.51 ^b	12.971±1.38 ^c	15.351±1.66 ^{cd}	4.721±0.85 ^a
	20~40	8.292±0.93 ^d	7.377±0.95 ^{cd}	6.587±0.58 ^c	4.801±0.85 ^b	7.645±1.35 ^{cd}	7.879±1.36 ^{cd}	2.395±0.43 ^a
	40~60	5.718±0.64 ^c	5.307±0.68 ^c	3.918±0.34 ^b	3.193±0.57 ^b	5.145±0.91 ^c	5.788±1.01 ^c	1.280±0.23 ^a

表 4 Person 相关性分析结果

Table 4 Results of Person correlation analysis

项目	含水率	有机碳	全氮	铵氮	硝氮	微生物量氮	速效磷	全磷
含水率	1.000							
有机碳	-0.546*	1.000						
全氮	-0.634**	-0.842**	1.000					
铵氮	-0.337	-0.678**	0.404	1.000				
硝氮	-0.395	-0.610**	0.805**	0.015	1.000			
微生物量氮	-0.454*	-0.872**	0.901**	0.535*	0.707**	1.000		
速效磷	-0.349	-0.759**	0.886**	0.431	0.687**	0.885**	1.000	
全磷	-0.765**	-0.771**	0.927**	0.436*	0.668**	0.832**	0.838**	1.000

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.5 不同的秸秆还田方式对各深度土壤全磷和速效磷的影响

通过表 3 可知, 与对照处理 G 相比, 秸秆还田处理的全磷速效磷含量均明显增加, 秸秆还田可以提高土壤磷素含量。其中 0~20 cm 土层中, 处理 C 下全磷含量最高, 为 830.87 mg·kg⁻¹ 比处理 G 增加了 26.23%, 同时增加了 162.06% 的速效磷含量; 处理 G 含量最低, 为 658.61 mg·kg⁻¹, 0~20 cm 土层磷含量从低到高依次是 G<D<E<F<A<B<C。

2.6 不同秸秆还田方式对土壤影响效果综合评价

2.6.1 指标的筛选

相关性分析结果表明 (表 4), 几种秸秆还田处理均可以对土壤理化性质产生影响, 为评价不同秸秆还田方式对土壤养分实际影响效果, 对候选指标进行相关性分析, 可以看出有机碳与其余指标相关性极强, 因此舍去; 硝氮与全氮相关性极强, 速效磷与全磷相关性极强, 但是全氮与全磷能全面反映土壤养分情况, 因此保留全氮和全磷作为评价指标; 虽然微生物量氮与其余指标相关性显著, 但是微生物量氮可以反映土壤微生物数量和活性, 所以予以保留。根据上述分析选取含水率、全氮、铵氮、微生物量氮和全磷 5 个指标作为土壤养分评价指标。

2.6.2 土壤综合评价

采用熵权法计算筛选出来的 5 个指标的权重, 各指标权重见表 5。

表 5 各指标权重
Table 5 Weight of each index

指标	权重
含水率	0.106
全氮	0.281
铵氮	0.141
微生物量氮	0.160
全磷	0.313

秸秆还田可以增加土壤养分, 但是养分增加会带来养分流失风险, 在土壤养分流失中, 硝态氮和铵态氮是氮素流失的主要形式, 主要是通过地表径流的方式流失^[13]。磷素则主要通过降水和排水造成的地表径流以溶解态磷和颗粒态磷的形式从土壤进入水体中^[14], 通过计算铵氮与硝氮之和占总氮的比例即 R_N 以及速效磷占总磷的比例 R_P, 即:

$$R_N = (\text{铵氮} + \text{硝氮}) / \text{全氮} \quad (1)$$

$$R_P = \text{速效磷} / \text{全磷} \quad (2)$$

通过比较各个处理以及各土层中 R_N 和 R_P 的高低来评估潜在的养分流失风险 (见表 6)。

表 6 土壤综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of soil

组别	0~20 cm			20~40 cm			40~60 cm		
	养分得分	R _N	R _P	养分得分	R _N	R _P	养分得分	R _N	R _P
A	0.092	0.017 6	0.013 8	0.044	0.019 8	0.021 7	0.020	0.020 8	0.016 7
B	0.098	0.016 9	0.015 8	0.046	0.019 1	0.018 0	0.015	0.020 5	0.016 3
C	0.103	0.012 6	0.017 2	0.053	0.019 5	0.014 9	0.028	0.018 0	0.011 0
D	0.074	0.012 5	0.015 8	0.031	0.017 6	0.014 0	0.017	0.014 2	0.009 9
E	0.082	0.011 7	0.015 6	0.042	0.017 8	0.020 0	0.032	0.021 5	0.014 5
F	0.084	0.010 4	0.018 5	0.038	0.015 5	0.020 0	0.020	0.015 3	0.017 6
G	0.055	0.013 7	0.005 0	0.020	0.022 4	0.007 8	0.006	0.021 6	0.004 7

通过熵权法得出的结果可以看出在 0~20 cm 养分增加效果更好的是 A (小麦秸秆全量还田处理)、B (玉米秸秆全量还田) 和 C (小麦玉米秸秆全量还田), 效果最好的是 C 处理。根据 R_N 和 R_P 可以评估潜在的养分流失风险。在 0~20 cm 土层, 除对照处理 D 和 G 外, 养分流失风险 B>A>C>E>F, 因此得出在增加土壤养分的前提下, 小麦玉米秸秆全量还田处理是一种既能增加养分又能降低潜在的面源污染的手段。同时 C 处理在垂直剖面上养分流失风险也是最低的。

3 讨论与结论

土壤含水率受土壤孔隙度、土壤容重的影响, 梁卫等^[15]在试验研究中发现秸秆还田配合施肥处理可以减少水分蒸发改善土壤结构, 增加土壤的含水率。本研究结果表明 0~40 cm 土层中, 秸秆还田处理的土壤中含水量显著高于不施肥也不还田处理, 因为秸秆还田后有机物料的腐解可以改善土壤结构, 保持土壤水分^[16]。但是在本试验中小麦玉米秸秆全量还田的处理下土壤含水率最低, 这是由于还田秸秆数量过多, 导致土壤容重过低, 土壤过于松

散,水分蒸发严重,这在蒋向^[17]对玉米秸秆对含水率的影响研究中得以证实。

土壤有机碳含量与土壤肥力密切相关,具有重要研究意义。研究证明^[18],玉米和小麦秸秆还田添加了外源有机物质,显著增加土壤中的有机碳含量^[19]。秸秆还田后土壤有机碳含量增加,大致有两个原因:一是秸秆本身作为一种碳源输入后,增加了土壤中可利用碳源^[20];另一方面相关报道认为是由于秸秆作为外源有机质输入后可以促进土壤团聚体形成,团聚体形成后增强了对有机碳的保护和固持能力^[21]。袁晓明等^[22]通过试验发现,全量秸秆还田相较于半量秸秆还田对土壤有机碳提升更高。本研究发现不同种类秸秆还田效果有差异,小麦秸秆还田效果优于玉米秸秆,这主要是由于两种秸秆性质不同导致的,小麦秸秆木质素含量低,分解容易,更容易影响土壤中有机碳含量,这与李硕等^[23]和梁尧尧等^[24]的研究结果相一致。

土壤全氮是土壤有机质的重要组成部分,与土壤活性有机质密切相关,受到广泛关注^[25]。研究结果表明,秸秆作为一种外源物质进行添加,可以有效增加土壤的全氮积累量,含量随还田秸秆量的增加而增加,这与其他研究^[26]结果相一致。同时小麦和玉米秸秆还田后碳氮比升高,高碳氮比促进土壤中的微生物吸收更多无机氮满足自身的需要^[27],微生物可以利用更多铵态氮和硝态氮^[28],致使更多有效态氮被同化进入土壤氮库,增加了土壤氮库的总量^[29]。本研究发现秸秆还田可以增加土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量^[30],通过降低土壤容重,提高土壤透气性^[31],使氮素更容易硝化,促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化^[32]。

微生物量氮对土壤扰动比较敏感,因此可以作为土壤生物指标^[33]。虽然微生物量氮仅占全氮的2%~6%^[34],但是土壤微生物量氮作为指示土壤微生物数量与活性的重要指标,可以反映土壤肥力情况。本次研究结果表明,秸秆还田为微生物提供碳源和氮源,促进微生物活性不断增强,从而影响微生物量氮含量^[35]。矫丽娜等^[36]通过相关试验研究发现,深层土层比0~20 cm 土层微生物氮含量低,这是由于上层土壤可以更好地与外界进行物质能量交换,进入土层后养分优先聚集于表层,底层土层不能与外界进行物质能量交换,因此微生物量氮含量低。

秸秆中含有丰富的磷素,随着秸秆腐解养分释放,徐国伟等^[37]通过连续3年秸秆还田试验,发现秸秆还田后土壤中全磷和速效磷含量显著增加,张

振江^[38]对小麦秸秆进行长期还田后显著增加了土壤全磷和速效磷含量,这与本次研究结果一致。

通过综合评价土壤养分,与对照处理G相比,其余处理均能增加土壤养分,养分增加效果 $\text{C}>\text{B}>\text{A}>\text{F}>\text{E}>\text{D}>\text{G}$;为了降低土壤养分流失造成环境面源污染的潜在风险,应结合土壤养分进行风险评估,0~20 cm 养分流失风险各秸秆还田处理养分流失风险依次是 $\text{E}>\text{F}>\text{C}>\text{A}>\text{B}$,垂直剖面上流失风险最低的是C处理。综合土壤养分增加状况与养分流失风险,可以得出小麦玉米秸秆全量还田是一种更好的还田方式。但是由于本试验时间较短,要揭示秸秆还田对土壤养分提升以及潜在面源污染的环境评估仍需进行长时间的监测与研究。

不同类型和数量的秸秆还田都可以增加土壤的养分,改善土壤理化性质。针对增加土壤养分,效果最好的是小麦玉米秸秆全量还田。从减少潜在的面源污染风险的角度来讲,适当的秸秆还田可以降低养分流失风险,耕作层各秸秆还田处理养分流失风险依次是 $\text{E}>\text{F}>\text{C}>\text{A}>\text{B}$ 。综合考虑,小麦玉米秸秆全量还田是一种更好的还田方式,既可以改善土壤状况,增加土壤养分,又可以降低潜在的面源污染风险,保护农业生态环境。

参考文献:

- [1] 甄丽莎,谷洁,高华,等. 秸秆还田与施肥对壤土酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(5): 196-201.
- [2] 孙建飞,郑聚锋,程琨,等. 基于可收集的秸秆资源量估算及利用潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 404-413.
- [3] 毕于运,王亚静,高春雨. 中国主要秸秆资源数量及其区域分布[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 1-7.
- [4] 马永良,师宏奎,张书奎,等. 玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(S1): 42-46.
- [5] 田育天,李湘伟,谢新乔,等. 秸秆还田对云南典型烟区土壤物理性状的影响[J]. 土壤, 2019, 51(5): 964-969.
- [6] 李静静,李从锋,李连禄,等. 苗带深松条件下秸秆覆盖对春玉米土壤水温及产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1787-1796.
- [7] 孙汉印,姬强,王勇,等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 369-376.
- [8] 李晓莎,武宁,刘玲,等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1765-1771.
- [9] 温明霞,林德枝,易时来,等. 秸秆在土壤中的养分释放动态研究[C]//第九届中国青年土壤科学工作者学术

- 讨论会暨第四届中国青年植物营养与肥料科学工作者学术讨论会论文集. 成都, 2004: 288-290.
- [10] 农传江, 王宇蕴, 徐智, 等. 有机物料腐熟剂对玉米和水稻秸秆还田效应的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(1): 34-41.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-109.
- [12] 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[J]. *Soil Biol Biochem*, 1985, 17(6): 837-842.
- [13] 王荣嘉, 高鹏, 李成, 等. 模拟降雨下麻栎林地地表径流和壤中流及氮素流失特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2732-2740.
- [14] 李瑞玲, 张永春, 曾远, 等. 太湖流域丘陵地区暴雨条件下农田氮素随地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1185-1190.
- [15] 梁卫, 袁静超, 张洪喜, 等. 东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展[J]. 东北农业科学, 2016, 41(2): 44-49.
- [16] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1527-1532.
- [17] 蒋向. 玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦根系发育和功能的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012.
- [18] 陈鲜妮, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 长期秸秆还田对壤土耕层土壤有机碳库的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 25-32.
- [19] HENRIKSEN T M, BRELAND T A. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31(8): 1121-1134.
- [20] SUN F F, LU S G. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2014, 177(1): 26-33.
- [21] NOELLEMEYER E, FRANK F, ALVAREZ C, et al. Carbon contents and aggregation related to soil physical and biological properties under a land-use sequence in the semiarid region of central Argentina[J]. *Soil Tillage Res*, 2008, 99(2): 179-190.
- [22] 袁晓明, 赵田芬, 杜斌, 等. 不同秸秆还田量对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 现代农业科技, 2015(1): 207-208.
- [23] 李硕, 把余玲, 李有兵, 等. 添加作物秸秆对土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 153-161.
- [24] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3565-3574.
- [25] 李文军, 杨奇勇, 赵迪, 等. 洞庭湖水稻土有机氮组分及其与可矿化氮的关系特征[J]. 中国土壤与肥料, 2018(5): 15-23.
- [26] 牛怡, 张仁陟, 蔡立群, 等. 促腐条件下小麦玉米秸秆还田土壤养分变化特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 152-158.
- [27] KHALIL M I, HOSSAIN M B, SCHMIDHALTER U. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37(8): 1507-1518.
- [28] NISHIO T, KOMADA M, ARAO T, et al. Simultaneous determination of transformation rates of nitrate in soil[J]. *Jpn Agric Res Q: JARQ*, 2001, 35(1): 11-17.
- [29] LUXHØI J, ELSGAARD L, THOMSEN I K, et al. Effects of long-term annual inputs of straw and organic manure on plant N uptake and soil N fluxes[J]. *Soil Use Manag*, 2007, 23(4): 368-373.
- [30] 黄婷苗, 郑险峰, 王朝辉. 还田玉米秸秆氮释放对关中黄土供氮和冬小麦氮吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(14): 2785-2795.
- [31] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1504-1510.
- [32] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 92-94.
- [33] BALOTA E L, COLOZZI FILHO A, ANDRADE D S, et al. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol[J]. *Soil Tillage Res*, 2004, 77(2): 137-145.
- [34] 徐英德, 丁雪丽, 李双异, 等. 不同肥力棕壤全氮和微生物量氮对外源玉米残体氮的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6818-6826.
- [35] 赵家煦. 东北黑土区秸秆还田深度对土壤水分动态及土壤酶、微生物 C、N 的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [36] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 秸秆还田深度对黑土腐殖质和酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(2): 17-21.
- [37] 徐国伟, 段骅, 王志琴, 等. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 934-942.
- [38] 张振江. 长期麦秆直接还田对作物产量与土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 1998, 29(4): 11-12.