

# 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤 无机氮量及酶活性的影响

陈盛<sup>1</sup>, 黄达<sup>1,2,3\*</sup>, 章二子<sup>4</sup>, 朱建彬<sup>1</sup>, 郭相平<sup>1</sup>

(1.河海大学 农业科学与工程学院, 南京 210098; 2.桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 3.广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004; 4.南京市江宁区水务局, 南京 210098)

**摘要:**【目的】秸秆是农业生态系统中宝贵的生物质资源, 资源总量丰富, 利用潜力巨大, 其中秸秆还田为最主要利用方式。研究确定秸秆隔层埋深以及最优的水氮组合, 为秸秆还田资源化高效利用提供理论支撑和应用依据。

【方法】通过小区试验, 研究不同秸秆埋深(表面覆盖、埋深 20 cm、埋深 30 cm)配合不同灌水量(80% $I_w$ 、 $I_w$ 、120% $I_w$ , 其中  $I_w$  为灌水定额)和不同施氮量(180、225、270 kg/hm<sup>2</sup>)下, 在番茄不同生育期土壤无机氮量及和酶活性受到的影响, 对比分析秸秆埋深、灌水量和施氮量耦合作用下对土壤中铵态氮、硝态氮量和脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶活性变化规律和影响效果。【结果】上层土壤铵态氮和硝态氮量随时间呈显著下降趋势( $P<0.05$ ), 下层土壤铵态氮和硝态氮量随时间呈显著上升趋势( $P<0.05$ ); 上层土壤脲酶活性随时间呈先显著下降后显著上升的趋势( $P<0.05$ ), 下层土壤脲酶活性呈先不变后显著上升的趋势( $P<0.05$ ); 上、下层土壤蔗糖酶活性均呈显著下降的趋势( $P<0.05$ ); 上、下层土壤过氧化氢酶活性变化不显著( $P>0.05$ ); 施氮量和秸秆埋深显著影响上层土壤铵态氮和硝态氮量( $P<0.05$ ), 高施氮量和秸秆埋深 20 cm 可显著提升上层土壤铵态氮和硝态氮量( $P<0.05$ ); 灌水量对下层土壤的铵态氮和硝态氮量影响显著( $P<0.05$ ), 增加灌水量有利于上层土壤铵态氮和硝态氮向下层土壤运移; 秸秆埋深对上、下层土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均影响显著( $P<0.05$ ), 秸秆埋深 20 cm 可有效提升上、下层土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。【结论】秸秆埋深 20 cm 具有较优保水保肥作用。综合考虑土壤无机氮量、酶活性、作物生长特点和节水需求, 当前水肥管理模式, 秸秆埋深 20 cm, 灌水量 80% $I_w$ , 施氮量 270 kg/hm<sup>2</sup> 为最优组合。

**关键词:** 秸秆隔层还田; 铵态氮; 硝态氮; 脲酶; 蔗糖酶; 过氧化氢酶

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022029

OSID: 

陈盛, 黄达, 章二子, 等. 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤无机氮量及酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 45-54.  
CHEN Sheng, HUANG Da, ZHANG Erzi, et al. The Effects of Straw Incorporation Depth on Nitrogen Dynamics and Enzymatic Activities in Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 45-54.

## 0 引言

【研究意义】秸秆是农作物重要光合产物和最主要副产品, 是农业生态系统中一种十分宝贵的生物质资源。相关统计公报显示, 农田秸秆年产量高达 8.5 亿 t<sup>[1]</sup>。近年来, 国家不断加大力度推动农作物秸秆资源化利用, 2020 年利用率达 87.6%, 实现秸秆肥料化、饲料化、燃料化和原料化等无害化高效利用<sup>[2]</sup>。秸秆还田是秸秆资源化利用最主要的方式, 每年约 3 亿 t 秸秆进行还田处理<sup>[2]</sup>, 数量巨大。施用

化肥是促进作物生长及产量、品质提升的必要措施, 当前我国化肥利用情况仍不甚理想, 化肥使用量巨大但利用效率较低, 过度施肥情况时有发生, 造成面源污染、土壤盐碱化等严重后果<sup>[3]</sup>。研究发现, 秸秆还田能释放自身的碳、氮、钾、磷等营养元素, 有效提升土壤肥力, 改善土壤结构和作物根系分布, 促进作物增产<sup>[4-7]</sup>; 具有保水保肥作用, 提高土壤含水率, 促进化肥溶解, 减少化肥淋失, 提升水肥利用效率<sup>[8-10]</sup>。对促进农业高效生产、发展绿色生态农业、构建资源节约型社会等具有十分重要的意义。

【研究进展】秸秆覆盖还田和隔层还田是最主要的秸秆直接还田方式<sup>[11]</sup>。传统秸秆覆盖还田采用收割机等机械, 收割打碎后还田, 秸秆以 10 cm 以上的段状为主, 操作较为简单快捷。但是段状秸秆短时间大量积聚, 易超过土壤消纳能力, 秸秆腐解缓慢, 导致

收稿日期: 2022-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0900703); 国家自然科学基金项目(52109052); 中国博士后科学基金资助项目(2021M690873); 广西建筑新能源与节能重点实验室(桂科能 22-J-21-8)

作者简介: 陈盛(1989-), 男, 博士, 主要从事盐碱土改良, 盐胁迫下的植物响应研究。E-mail: chens@hhu.edu.com

通信作者: 黄达(1990-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事盐碱土改良, 盐胁迫下的植物响应研究。E-mail: dada-wong@hhu.edu.com

农田表层土壤出现“孔洞”现象,影响后茬作物种子萌发与秧苗根系着土,增加死苗、弱苗比例<sup>[12]</sup>;秸秆中易携带病原菌、虫卵和草籽等,覆盖还田容易诱发或加剧下茬作物病虫害风险<sup>[12]</sup>,农民对秸秆还田产生抵触情绪,制约秸秆还田技术的推广应用。秸秆隔层还田较覆盖还田更利于土壤微生物的生长与繁殖,加快秸秆腐解速度<sup>[13]</sup>;同时,秸秆掩埋后能有效地消灭病残体,减少田间菌源量,杀死害虫幼虫<sup>[14]</sup>,从而一定程度上缓解了土壤“孔洞”和病虫害的问题;而且,秸秆隔层还田的保水保肥效果较表层覆盖更为显著<sup>[15]</sup>。秸秆隔层在土壤中形成异质层,土壤理化性质发生突变,形成“毛细阻滞”和“水力阻滞”,减缓上层土壤水分入渗<sup>[16]</sup>,阻断毛管水上升路径,减少下层土壤水分蒸发<sup>[17]</sup>,有效提高土壤含水率,促进土壤肥料溶解,有利于肥料积累与作物吸收。然而,由于秸秆碳氮比较高,秸秆腐化过程中微生物大量增殖消耗土壤速效氮,导致土壤氮元素不足,反而影响作物生长,造成作物减产<sup>[18]</sup>。因此,秸秆还田应配合氮肥施用,降低碳氮比,避免还田腐解前期与微生物“争氮”产生的不利影响,提高作物氮肥偏生产力及氮肥农学利用率<sup>[19]</sup>。此外,秸秆隔层节水效果受秸秆还田方式、耕作方式、灌溉方式、气候环境、土壤理化性质等多种因素影响,需针对不同情况具体分析。

土壤中的无机氮素主要是以铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )的形式存在,是作物吸收和利用的主要形态。土壤无机氮量是衡量土壤肥力大小的重要参数,表征土壤供氮能力<sup>[20]</sup>。土壤酶是土壤中最活跃的有机物质之一,其活性可反映土壤中物质代谢的旺盛程度和土壤肥力大小,是评价土壤含养分量及土壤环境质量的重要指标<sup>[21]</sup>。目前,秸秆还田对土壤无机氮量和土壤酶活性的研究结果不尽相同,甚至有所矛盾。有学者研究发现秸秆还田显著提升无机氮量<sup>[22]</sup>或土壤酶活性<sup>[23]</sup>,但也有学者发现秸秆还田会明显降低无机氮量<sup>[24]</sup>或土壤酶活性<sup>[25]</sup>,抑或对二者无显著影响<sup>[26-27]</sup>。土壤无机氮量和酶活性影响因素纷繁复杂,秸秆还田方式、氮肥施用量、土壤含水率、土壤类型及酸碱度、耕作方式等都可能对其造成一定影响,需结合实际情况具体研究。

【切入点】目前,秸秆隔层还田结合水氮管理下土壤不同形态无机氮量和土壤酶活性的变化规律和影响效果研究较少,结论尚未统一,有待进一步探明。【拟解决的关键问题】本研究开展小区试验,研究秸秆隔层及水氮管理对土壤无机氮量和土壤酶活性的影响情况。对比分析不同秸秆埋深、灌水量和氮肥量耦合作用下对土壤中铵态氮、硝态氮量和

脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶活性的影响,探明其变化规律和影响效果,确定最优的秸秆隔层埋深及水氮组合,以期为秸秆还田资源化高效利用提供理论支撑和应用依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2020年5月17日—8月20日在江苏省南京市河海大学江宁校区节水园区温室大棚内( $31^\circ 57'\text{N}$ ,  $118^\circ 50'\text{E}$ )开展,试验土壤为园区土壤,土壤类型为黄土,土壤质地为黏壤土。种植前深翻园区土壤,将上、下层土壤充分均匀混合后平整土地。土壤饱和含水率38.2%,田间持水率30.6%,干体积质量 $1.3\text{ g/cm}^3$ ,初始有机碳量 $2.4\text{ g/kg}$ ,硝态氮量 $1.4\text{ mg/kg}$ ,铵态氮量 $0.9\text{ mg/kg}$ ,速效磷量 $15.4\text{ mg/kg}$ 。试验作物选用“美国903”番茄(*Solanum lycopersicon* L. var. *Yazhoufenwang*),秸秆为试验园区2019年收割的水稻秸秆。试验期内气温 $20.7\sim 43.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,平均气温 $28.3\text{ }^\circ\text{C}$ ;湿度35.8%~96.2%,平均湿度80.7%。

### 1.2 试验设计

试验采用正交试验,利用正交试验“均衡分散性”和“整齐可比性”的特点,通过部分代表性强的试验处理即可判断各因素对试验指标的影响情况。设计不同的秸秆隔层埋深(S)、灌水量(W)、氮肥用量(N),设置3个因素3个水平,总共9个试验处理,每个处理3次重复。采用起垄种植,共27垄,每垄长度5 m,间距50 cm,每垄种植10株番茄。秸秆表层覆盖处理直接起垄,垄高10 cm,垄顶宽20 cm,底宽30 cm。将长度约10 cm水稻秸秆均匀铺设于垄上,每垄铺设秸秆4 kg。秸秆埋深20 cm和30 cm处理先分别开挖15 cm和25 cm的小沟,沟宽30 cm,长度约5 m;将等质量及长度的水稻秸秆均匀铺设于沟底并压实,压实后的秸秆隔层厚度约5 cm;回填土方并起垄,起垄高度确保秸秆埋深符合设计要求,垄顶宽20 cm,底宽30 cm。每垄单次中等灌水量为田间持水率70%~90%的净灌水定额 $I_w$ ,经计算中等灌水量为32 L;高、低等灌水量分别为 $120\%I_w$ 和 $80\%I_w$ ,即38 L和26 L。氮肥选用分析纯尿素 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ,按实际生产经验,中等施氮量取 $225\text{ kg/hm}^2$ ,高、低等施氮量分别取中等施氮量的1.2倍和0.8倍,即 $270\text{ kg/hm}^2$ 和 $180\text{ kg/hm}^2$ 。具体试验处理见表1。选取长势良好且均匀的番茄幼苗于2020年5月17日移栽并浇灌等量定根水。采用水肥一体化的灌溉方式,将尿素溶于灌溉水,均分4次施用,施用时间分别为番茄移栽后15、36、52、74 d。利用滴灌带进行灌水和施肥,滴灌带铺设于垄顶部的番茄根部。

### 1.3 样品采集与测定

埋设秸秆隔层的处理以秸秆隔层为界，隔层以上土壤作为上层土壤，隔层以下 20 cm 以内土壤作为下层土壤。采用直径 5 cm 的土钻自垄顶向下取土，自然风干后除去植物根系等杂质，过筛(孔径 5 mm)后均匀混合待测。秸秆表层覆盖的处理分别自垄顶向下依次钻取 0~25 cm 土层的土壤作为上层土壤，钻取 25~45 cm 土层的土壤作为下层土壤，经过晾干、过筛和混合后待测。分别于移栽后 30 d (苗期)、51 d (花期)、67 d (坐果期)、89 d (收获期)测试各指标。具体测试指标及测试方法见表 2。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental Treatment

| 处理                                           | 秸秆埋深/cm | 灌水量/L | 施氮量/(kg hm <sup>-2</sup> ) |
|----------------------------------------------|---------|-------|----------------------------|
| S <sub>0</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> | 0       | 38    | 270                        |
| S <sub>0</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> | 0       | 32    | 225                        |
| S <sub>0</sub> W <sub>3</sub> N <sub>3</sub> | 0       | 26    | 180                        |
| S <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> | 20      | 38    | 225                        |
| S <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub> | 20      | 32    | 180                        |
| S <sub>1</sub> W <sub>3</sub> N <sub>1</sub> | 20      | 26    | 270                        |
| S <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub> | 30      | 38    | 180                        |
| S <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> | 30      | 32    | 270                        |
| S <sub>2</sub> W <sub>3</sub> N <sub>2</sub> | 30      | 26    | 225                        |

注 处理代号中 S 代表秸秆隔层, W 代表灌水量, N 代表氮素施用量; S 的下标 0、1、2 分别表示秸秆表层覆盖、秸秆隔层埋深 20 cm、秸秆隔层埋深 30 cm; W、N 的下标 1 代表高水平, 2 代表中水平, 3 代表低水平; 下同。

表 2 测试指标及测试方法

Table 2 Test indexes and test methods

| 测试指标    | 测试方法                  |
|---------|-----------------------|
| 土壤铵态氮   | 2 mol/L KCl 浸提—靛酚蓝比色法 |
| 土壤硝态氮   | 二磺酸比色法                |
| 土壤蔗糖酶   | 3,5-二硝基水杨酸比色法         |
| 土壤脲酶    | 苯酚-次氯酸钠比色法            |
| 土壤过氧化氢酶 | 高锰酸钾滴定法               |

### 1.4 数据处理

利用 Excel (Excel 2010, Microsoft) 对数据进行计算处理并绘图, 利用 SPSS (IBM SPSS Statistics 19) 中单因素方差分析进行组间比较, 多重比较采用 Duncan 法 ( $P < 0.05$ )。正交试验结果采用方差分析法, 利用 SPSS (IBM SPSS Statistics 19) 进行方差的单变量分析, 计算各因素的  $F$  统计量, 并得到对应的相伴概率  $P$  值。 $P$  值越小, 表示该因素对测试指标影响越显著, 从而确定各测试指标的主要影响因素及其显著性。计算对比各因素均值, 确定各因素的最优水平, 最终得到各测试指标的最优组合。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆隔层及水氮管理对土壤铵态氮量的影响

对比上层土壤铵态氮量(表 3), 相同测试期内,

S<sub>1</sub>W<sub>3</sub>N<sub>1</sub> 处理的上层土壤铵态氮量均为最大值, 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); S<sub>2</sub>W<sub>1</sub>N<sub>3</sub> 处理的上层土壤铵态氮量均为最小值, 除 S<sub>0</sub>W<sub>3</sub>N<sub>3</sub> 处理, 均显著低于其他处理 ( $P < 0.05$ )。相同处理的上层土壤铵态氮量随时间呈显著下降趋势 ( $P < 0.05$ ), 降幅达 15.86%~26.96%, 移栽 89 d 时的铵态氮量均显著低于移栽 30 d 的铵态氮量 ( $P < 0.05$ )。对比不同测试期上层土壤铵态氮量影响因素显著性(表 5), 上层土壤铵态氮量的影响因素主次顺序均为: 施氮量 > 秸秆埋深 > 灌水量, 除移栽 67 d, 其他测试期的施氮量和秸秆埋深均影响显著 ( $P < 0.05$ ), 在移栽 30 d 和 51 d, 施氮量的影响为极显著水平 ( $P < 0.01$ ); 灌水量在各测试期对上层土壤铵态氮影响不显著 ( $P > 0.05$ )。分析各影响因素的最优水平, 上层土壤铵态氮最优组合为 S<sub>1</sub>W<sub>3</sub>N<sub>1</sub> 处理, 提高施氮量和秸秆埋深 20 cm 可显著提升上层土壤铵态氮量 ( $P < 0.05$ )。

表 3 上层土壤铵态氮量

Table 3 The amount of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in the upper soil mg/kg

| 处理                                           | 移栽 30 d       | 移栽 51 d       | 移栽 67 d       | 移栽 89 d      |
|----------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| S <sub>0</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> | 21.28±0.95cA  | 20.03±0.98cA  | 18.51±0.51cB  | 15.93±0.63cC |
| S <sub>0</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> | 21.32±0.5cA   | 19.35±0.5cB   | 18.99±0.74cB  | 15.98±0.56cC |
| S <sub>0</sub> W <sub>3</sub> N <sub>3</sub> | 14.22±0.21eA  | 13.24±0.16efB | 12.04±0.18efC | 10.38±0.22eD |
| S <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> | 23.61±1.29bA  | 22.53±1.23bAB | 21.24±1.31bB  | 18.90±0.92bC |
| S <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub> | 15.95±0.69eA  | 14.62±0.77eB  | 12.41±0.77eC  | 12.78±0.35dC |
| S <sub>1</sub> W <sub>3</sub> N <sub>1</sub> | 28.85±1.49aA  | 27.7±1.07aAB  | 25.61±0.98aBC | 24.28±1.64aC |
| S <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub> | 14.62±0.47efA | 12.78±0.53fB  | 10.68±0.43fC  | 11.32±0.39eC |
| S <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> | 22.63±0.74bcA | 19.4±1.12cB   | 17.59±1.17cC  | 17.07±0.22cC |
| S <sub>2</sub> W <sub>3</sub> N <sub>2</sub> | 18.38±1.28dA  | 16.31±1.3dAB  | 14.85±1.6dBC  | 13.84±0.47dC |

注 表中值为均值±标准差; 不同小写字母表示同一列数据差异显著 ( $P < 0.05$ ), 即相同测试期内不同处理的测试指标差异显著; 不同大写字母表示同一行数据差异显著 ( $P < 0.05$ ), 即相同处理在不同测试期的测试指标差异显著; 下同。

分析下层土壤铵态氮量(表 4), 相同测试期内, S<sub>0</sub>W<sub>1</sub>N<sub>1</sub> 处理的下层土壤铵态氮量均为最大值, 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); S<sub>0</sub>W<sub>3</sub>N<sub>3</sub> 处理则均为最小值, 除 S<sub>1</sub>W<sub>3</sub>N<sub>1</sub> 处理, 均显著低于其他处理 ( $P < 0.05$ )。相同处理的下层土壤铵态氮量随时间呈显著上升趋势 ( $P < 0.05$ ), 涨幅达 42.44%~121.72%, 移栽 89 d 时的铵态氮量均显著高于移栽 30 d 的铵态氮量 ( $P < 0.05$ )。对比不同测试期下层土壤铵态氮量影响因素显著性(表 5), 除移栽 30 d, 下层铵态氮量的影响因素主次顺序均为: 灌水量 > 施氮量 > 秸秆埋深, 灌水量和施氮量对下层土壤铵态氮量影响显著 ( $P < 0.05$ ); 秸秆埋深在各测试期内影响均不显著 ( $P > 0.05$ )。分析可得下层铵态氮量最优组合为 S<sub>0</sub>W<sub>1</sub>N<sub>1</sub> 处理, 缺少秸秆隔层的阻滞作用, 铵态氮更易下渗, 加大氮素淋失风险。

表 4 下层土壤铵态氮量

| Table 4 The amount of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the lower soil mg/kg |              |              |               |               |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 处理                                                                             | 移栽 30 d      | 移栽 51 d      | 移栽 67 d       | 移栽 89 d       |
| $\text{S}_0\text{W}_1\text{N}_1$                                               | 11.25±0.31aD | 12.56±0.34aC | 15.00±0.21aB  | 16.02±0.17aA  |
| $\text{S}_0\text{W}_2\text{N}_2$                                               | 6.98±0.60bB  | 8.01±0.58cB  | 9.83±0.68cA   | 10.57±0.65cA  |
| $\text{S}_0\text{W}_3\text{N}_3$                                               | 3.04±0.65eB  | 3.91±0.61eB  | 5.62±0.58eA   | 6.32±0.57eA   |
| $\text{S}_1\text{W}_1\text{N}_2$                                               | 6.94±0.86bB  | 8.11±0.82bcB | 10.20±0.67bcA | 10.92±0.60bcA |
| $\text{S}_1\text{W}_2\text{N}_3$                                               | 7.30±0.59bB  | 8.34±0.59bcB | 10.16±0.58bcA | 10.84±0.66bcA |
| $\text{S}_1\text{W}_3\text{N}_1$                                               | 3.67±0.71deB | 4.61±0.65deB | 6.18±0.53deA  | 6.89±0.52deA  |
| $\text{S}_2\text{W}_1\text{N}_3$                                               | 3.81±0.53deC | 8.26±0.54bcB | 10.20±0.60bcA | 11.06±0.54bcA |
| $\text{S}_2\text{W}_2\text{N}_1$                                               | 5.31±0.77cC  | 9.25±0.76bB  | 11.13±0.83bA  | 11.77±0.8bA   |
| $\text{S}_2\text{W}_3\text{N}_2$                                               | 4.89±1.10cdB | 5.46±0.82dB  | 6.99±0.38dA   | 7.60±0.38dA   |

表 5 不同测试期上、下层土壤铵态氮量影响因素显著性分析

| Table 5 Significant analysis of influencing factors of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in upper and lower soil during different testing periods |         |       |         |       |         |       |         |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| 因素                                                                                                                                                    | 移栽 30 d |       | 移栽 51 d |       | 移栽 67 d |       | 移栽 89 d |       |
|                                                                                                                                                       | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    |
| 秸秆埋深                                                                                                                                                  | 0.030   | 0.065 | 0.021   | 0.076 | 0.255   | 0.073 | 0.025   | 0.070 |
| 灌水量                                                                                                                                                   | 0.095   | 0.045 | 0.084   | 0.013 | 0.879   | 0.012 | 0.091   | 0.012 |
| 施氮量                                                                                                                                                   | 0.009   | 0.071 | 0.010   | 0.049 | 0.106   | 0.048 | 0.013   | 0.047 |

注  $P<0.05$  表示该因素对指标影响显著,  $P<0.01$  表示该因素对指标影响极显著, 下同。

## 2.2 秸秆隔层及水氮管理对土壤硝态氮量的影响

表 6 为上层土壤硝态氮量, 由表 6 可知, 相同测试期内,  $\text{S}_1\text{W}_3\text{N}_1$  处理的上层土壤硝态氮量始终最高, 显著高于其他处理 ( $P<0.05$ );  $\text{S}_0\text{W}_3\text{N}_3$  处理的上层土壤硝态氮量始终最低, 除  $\text{S}_1\text{W}_1\text{N}_3$  处理, 均显著高于其他处理 ( $P<0.05$ )。相同处理的上层土壤硝态氮量随时间呈显著下降趋势 ( $P<0.05$ ), 移栽 89 d 时的硝态氮量均显著低于移栽 30 d 的硝态氮量 ( $P<0.05$ ), 降幅达 23.20%~37.10%。对比不同测试期上层土壤硝态氮量影响因素及显著性 (表 8), 上层土壤硝态氮量的影响因素主次顺序均为: 施氮量>秸秆埋深>灌水量, 除移栽 51 d, 其他测试期的施氮量和秸秆埋深均影响显著 ( $P<0.05$ ); 除移栽 67 d, 灌水量对上层土壤硝态氮量影响不显著 ( $P>0.05$ )。分析各影响因素的最优水平, 上层土壤硝态氮最优组合为  $\text{S}_1\text{W}_3\text{N}_1$  处理 (埋深 20 cm+低水+高氮), 与上层土壤铵态氮结果相同。

表 6 上层土壤硝态氮量

| Table 6 The amount of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in the upper soil mg/kg |              |               |              |              |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| 处理                                                                             | 移栽 30 d      | 移栽 51 d       | 移栽 67 d      | 移栽 89 d      |
| $\text{S}_0\text{W}_1\text{N}_1$                                               | 36.03±0.39bA | 30.18±0.33cB  | 26.10±0.31bC | 23.53±1.23bD |
| $\text{S}_0\text{W}_2\text{N}_2$                                               | 31.65±0.92cA | 27.46±0.82dB  | 23.13±0.74cC | 21.02±0.78cD |
| $\text{S}_0\text{W}_3\text{N}_3$                                               | 23.34±0.44fA | 20.67±0.33hB  | 17.24±0.39eC | 15.15±0.21eD |
| $\text{S}_1\text{W}_1\text{N}_2$                                               | 32.77±1.25cA | 26.41±0.39eB  | 22.86±0.30cC | 20.61±0.26cD |
| $\text{S}_1\text{W}_2\text{N}_3$                                               | 25.34±0.40eA | 22.11±0.32gB  | 18.69±0.26dC | 17.66±0.30dD |
| $\text{S}_1\text{W}_3\text{N}_1$                                               | 49.83±0.89aA | 43.23±1.01aB  | 37.49±0.66aC | 34.57±0.80aD |
| $\text{S}_2\text{W}_1\text{N}_3$                                               | 23.89±0.45fA | 21.34±0.12ghB | 16.46±0.26eC | 17.31±0.75dC |
| $\text{S}_2\text{W}_2\text{N}_1$                                               | 35.07±0.90bA | 32.28±0.40bB  | 26.02±0.76bC | 24.51±0.96bD |
| $\text{S}_2\text{W}_3\text{N}_2$                                               | 27.69±1.00dA | 25.05±0.32fB  | 22.63±0.67cC | 21.27±0.62cD |

表 7 为下层土壤硝态氮量, 由表 7 可知, 相同测试期内,  $\text{S}_0\text{W}_1\text{N}_1$  处理的下层土壤硝态氮量均为最大值, 显著高于其他处理 ( $P<0.05$ );  $\text{S}_0\text{W}_3\text{N}_3$  处理则均为最小值, 除移栽 30 d 和 89 d 的  $\text{S}_1\text{W}_3\text{N}_1$  处理, 均显著低于其他处理 ( $P<0.05$ )。除  $\text{S}_1\text{W}_2\text{N}_3$  处理, 相同处理的下层土壤硝态氮量随时间呈显著上升趋势 ( $P<0.05$ ), 移栽 89 d 时的硝态氮量均显著高于移栽 30 d 的硝态氮量 ( $P<0.05$ ), 涨幅达 16.38%~59.48%。对比下层土壤硝态氮的影响因素显著性 (表 8), 下层铵态氮量的影响因素主次顺序均为: 灌水量>施氮量>秸秆埋深, 灌水量对其影响显著 ( $P<0.05$ ), 施氮量和秸秆埋深在各测试期内影响均不显著 ( $P>0.05$ ), 施氮量对下层土壤硝态氮的影响小于对下层土壤铵态氮的影响。下层硝态氮量最优组合同样为  $\text{S}_0\text{W}_1\text{N}_1$  处理。总体上, 秸秆隔层及水氮管理对上下层土壤硝态氮和铵态氮量的影响情况和变化规律基本相同。

表 7 下层土壤硝态氮量

| Table 7 The amount of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in the lower soil mg/kg |               |                |               |               |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| 处理                                                                             | 移栽 30 d       | 移栽 51 d        | 移栽 67 d       | 移栽 89 d       |
| $\text{S}_0\text{W}_1\text{N}_1$                                               | 17.09±0.45aC  | 18.65±0.95aBC  | 20.51±1.06aB  | 22.81±1.34aA  |
| $\text{S}_0\text{W}_2\text{N}_2$                                               | 11.6±0.33cdC  | 11.85±0.34cdC  | 13.18±0.37cdB | 14.92±0.17cdA |
| $\text{S}_0\text{W}_3\text{N}_3$                                               | 7.26±0.42fD   | 8.58±0.41fC    | 9.96±0.52gB   | 11.58±0.51gA  |
| $\text{S}_1\text{W}_1\text{N}_2$                                               | 12.71±0.82bC  | 14.55±0.91bB   | 15.39±0.77bAB | 16.67±0.80bA  |
| $\text{S}_1\text{W}_2\text{N}_3$                                               | 11.97±0.38bcA | 12.22±1.10cdA  | 12.89±1.13deA | 13.93±1.13deA |
| $\text{S}_1\text{W}_3\text{N}_1$                                               | 7.82±0.59fC   | 10.57±0.47eB   | 11.34±0.36fB  | 12.31±0.30fgA |
| $\text{S}_2\text{W}_1\text{N}_3$                                               | 11.65±0.48cdD | 12.72±0.39cC   | 14.20±0.19cB  | 15.32±0.20cA  |
| $\text{S}_2\text{W}_2\text{N}_1$                                               | 10.92±0.59deD | 12.14±0.14cdC  | 12.95±0.36deB | 13.97±0.23deA |
| $\text{S}_2\text{W}_3\text{N}_2$                                               | 10.49±0.71eC  | 11.18±0.37deBC | 11.96±0.34efB | 12.91±0.40efA |

表 8 不同时期上、下层土壤硝态氮影响因素显著性分析

| Table 8 Significant analysis of influencing factors of soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in upper and lower soil during different testing periods |         |       |         |       |         |       |         |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| 因素                                                                                                                                                    | 移栽 30 d |       | 移栽 51 d |       | 移栽 67 d |       | 移栽 89 d |       |
|                                                                                                                                                       | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    |
| 秸秆埋深                                                                                                                                                  | 0.038   | 0.088 | 0.052   | 0.087 | 0.038   | 0.072 | 0.049   | 0.053 |
| 灌水量                                                                                                                                                   | 0.077   | 0.028 | 0.067   | 0.020 | 0.047   | 0.018 | 0.064   | 0.017 |
| 施氮量                                                                                                                                                   | 0.012   | 0.078 | 0.012   | 0.050 | 0.009   | 0.051 | 0.015   | 0.051 |

## 2.3 秸秆隔层及水氮管理对土壤脲酶活性的影响

表 9 为上层土壤脲酶活性, 由表 9 可知, 秸秆埋深 20 cm 的 3 个处理的上层土壤脲酶活性在各测试期均显著高于秸秆表层覆盖和秸秆埋深 30 cm 的处理 ( $P<0.05$ )。以移栽 89 d 为例, 秸秆埋深 20 cm 的 3 个处理均值为 0.76 g/mg, 显著高于表层覆盖均值 31.58%和秸秆埋深 30 cm 均值 47.37% ( $P<0.05$ )。  $\text{S}_1\text{W}_3\text{N}_1$  处理在移栽 30、51 d 和 67 d 时均为最高水平。相同处理的上层土壤脲酶活性随时间呈先显著下降后显著上升的趋势 ( $P<0.05$ ), 在移栽 51 d 处发生转折, 最终涨幅为 3.96%~84.82%。除  $\text{S}_2\text{W}_3\text{N}_2$  处理, 移栽 89 d 的上层土壤脲酶活性显著高于其他测试期的脲

酶活性。对比不同测试期上层土壤脲酶活性影响因素显著性（表 10），上层土壤脲酶活性的影响主次顺序依次为：秸秆埋深>施氮量>灌水量，秸秆埋深的影响在各测试期达到显著（ $P<0.05$ ）甚至极显著（ $P<0.01$ ）水平，施氮量（除移栽 30 d）和灌水量对上层土壤脲酶活性影响不显著（ $P>0.05$ ）。分析得到上层土壤脲酶活性的最优组合为  $S_1W_3N_1$  处理，秸秆埋深 20 cm 能显著提升上层土壤脲酶活性。

表 9 上层土壤脲酶活性

| 处理          | 移栽 30 d      | 移栽 51 d        | 移栽 67 d       | 移栽 89 d      |
|-------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| $S_0W_1N_1$ | 0.37 ±0.04bB | 0.18 ±0.02bcC  | 0.39 ±0.03bB  | 0.57 ±0.01cA |
| $S_0W_2N_2$ | 0.35 ±0.01bB | 0.15 ±0.01cdC  | 0.33 ±0.02deB | 0.55 ±0.01cA |
| $S_0W_3N_3$ | 0.34 ±0.05bB | 0.14 ±0.01dC   | 0.32 ±0.01deB | 0.45 ±0.02dA |
| $S_1W_1N_2$ | 0.45 ±0.05aB | 0.20 ±0.02abC  | 0.40 ±0.01bB  | 0.83 ±0.02aA |
| $S_1W_2N_3$ | 0.46 ±0.04aB | 0.18 ±0.01bcD  | 0.37 ±0.03bcC | 0.71 ±0.04bA |
| $S_1W_3N_1$ | 0.50 ±0.02aB | 0.22 ±0.04aC   | 0.52 ±0.03aB  | 0.73 ±0.03bA |
| $S_2W_1N_3$ | 0.33 ±0.03bB | 0.14 ±0.01dC   | 0.30 ±0.02eB  | 0.42 ±0.02dA |
| $S_2W_2N_1$ | 0.38 ±0.03bB | 0.18 ±0.03bcC  | 0.35 ±0.02cdB | 0.44 ±0.02dA |
| $S_2W_3N_2$ | 0.34 ±0.02bA | 0.17 ±0.01bcdC | 0.30 ±0.02eB  | 0.35 ±0.01eA |

表 10 不同测试期上、下层土壤脲酶活性影响因素显著性分析

| 因素   | 移栽 30 d |       | 移栽 51 d |       | 移栽 67 d |       | 移栽 89 d |       |
|------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
|      | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    |
| 秸秆隔层 | 0.001   | 0.045 | 0.043   | 0.043 | 0.042   | 0.016 | 0.008   | 0.019 |
| 灌水量  | 0.071   | 0.098 | 0.636   | 0.075 | 0.400   | 0.138 | 0.095   | 0.500 |
| 施氮量  | 0.007   | 0.061 | 0.052   | 0.600 | 0.054   | 0.034 | 0.218   | 0.045 |

表 11 为下层土壤脲酶活性，由表 11 可知，秸秆埋深 20 cm 的 3 个处理的下层土壤脲酶活性总体高于其他处理，移栽后 67 d 和 89 d 时差异更为明显，移栽 89 d 时秸秆埋深 20 cm 的均值较秸秆埋深 30 cm 均值和秸秆表面覆盖均值分别显著提高 22.22% 和 11.11%（ $P<0.05$ ）。除移栽 51 d， $S_1W_3N_1$  处理在各测试期均为最高水平。相同处理的下层土壤脲酶活性呈先不变后显著上升的趋势，在移栽 30 d 和 51 d 无显著变化（ $P>0.05$ ），在移栽 67 d 和 89 d 显著上升（ $P<0.05$ ），涨幅为 85.71%~136.59%，各处理移栽 89 d 的脲酶活性均显著高于其他测试期脲酶活性（ $P<0.05$ ）。分析下层土壤脲酶活性影响因素显著性（表 11），下层土壤脲酶活性的影响主次顺序为：秸秆埋深>施氮量>灌水量，秸秆埋深在各测试期内均影响显著（ $P<0.05$ ）；施氮量在移栽 67 d 和 89 d 时影响显著（ $P<0.05$ ），移栽 30 d 和 51 d 无显著影响（ $P>0.05$ ）；灌水量则在各时期内影响均不显著（ $P>0.05$ ）。分析得到下层土壤脲酶活性的最优组合为  $S_1W_3N_1$  处理，与上层土壤脲酶活性的最优组

合相同。

表 11 下层土壤脲酶活性

| 处理          | 移栽 30 d       | 移栽 51 d       | 移栽 67 d        | 移栽 89 d        |
|-------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| $S_0W_1N_1$ | 0.14 ±0.01bC  | 0.13 ±0.01abC | 0.23 ±0.02bcdB | 0.31 ±0.02bcdA |
| $S_0W_2N_2$ | 0.15 ±0.03bC  | 0.13 ±0.01bC  | 0.21 ±0.03cdB  | 0.28 ±0.03cdA  |
| $S_0W_3N_3$ | 0.14 ±0.01bC  | 0.12 ±0.01bC  | 0.20 ±0.02dB   | 0.26 ±0.04dA   |
| $S_1W_1N_2$ | 0.17 ±0.01abC | 0.15 ±0.02abC | 0.27 ±0.05abB  | 0.35 ±0.04abA  |
| $S_1W_2N_3$ | 0.15 ±0.02bB  | 0.15 ±0.01abB | 0.25 ±0.07abcA | 0.33 ±0.06abcA |
| $S_1W_3N_1$ | 0.20 ±0.02aC  | 0.13 ±0.02abD | 0.30 ±0.02aB   | 0.39 ±0.03aA   |
| $S_2W_1N_3$ | 0.16 ±0.04abC | 0.15 ±0.01abC | 0.21 ±0.02bcdB | 0.30 ±0.02bcdA |
| $S_2W_2N_1$ | 0.17 ±0.03abC | 0.16 ±0.03aC  | 0.25 ±0.02abcB | 0.33 ±0.01abcA |
| $S_2W_3N_2$ | 0.14 ±0.03bC  | 0.14 ±0.01abC | 0.26 ±0.04bcdB | 0.32 ±0.04bcdA |

## 2.4 秸秆隔层及水氮管理对土壤蔗糖酶活性的影响

表 12 为上层土壤蔗糖酶活性，由表 12 可知，除移栽 30 d， $S_1W_3N_1$  处理在各自测试期中均处于最高水平，埋深 20 cm 的 3 个处理总体上明显高于其他处理（ $P<0.05$ ）； $S_2W_1N_3$  处理在各自测试期中均处于最低水平。相同处理的上层土壤蔗糖酶活性均呈现显著下降的趋势（ $P<0.05$ ），降幅为 33.33%~70.61%，移栽 89 d 时的蔗糖酶活性均显著低于移栽 30 d 的蔗糖酶活性（ $P<0.05$ ）。分析其影响因素显著性（表 14），影响上层蔗糖酶活性的主次顺序依次为：秸秆埋深>施氮量>灌水量，除移栽 51 d 的施氮量，秸秆埋深与施氮量在各测试期均影响显著（ $P<0.05$ ）；灌水量在各测试期影响均不显著（ $P>0.05$ ）。分析得到上层土壤蔗糖活性的最优组合为  $S_1W_2N_1$  处理，秸秆埋深 20 cm 配合高施氮量有利于上层土壤蔗糖酶活性的提升。

表 12 上层土壤蔗糖酶活性

| 处理          | 移栽 30 d       | 移栽 51 d       | 移栽 67 d       | 移栽 89 d      |
|-------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| $S_0W_1N_1$ | 7.30 ±0.14aA  | 4.30 ±0.41bcB | 3.42 ±0.08cC  | 2.15 ±0.08cD |
| $S_0W_2N_2$ | 5.90 ±0.3cdA  | 4.41 ±0.31bcB | 3.65 ±0.09bcC | 2.13 ±0.11cD |
| $S_0W_3N_3$ | 4.88 ±0.29efA | 3.09 ±0.29deB | 2.23 ±0.29eC  | 2.14 ±0.07cC |
| $S_1W_1N_2$ | 5.43 ±0.09deA | 4.47 ±0.49bcB | 3.76 ±0.09abC | 3.23 ±0.2aD  |
| $S_1W_2N_3$ | 6.28 ±0.18bcA | 4.93 ±0.37abB | 3.36 ±0.33cC  | 2.86 ±0.17bC |
| $S_1W_3N_1$ | 6.61 ±0.39bA  | 5.28 ±0.33aB  | 4.01 ±0.13aC  | 3.19 ±0.08aC |
| $S_2W_1N_3$ | 3.41 ±0.08hA  | 2.88 ±0.07eB  | 2.58 ±0.08dC  | 2.27 ±0.07cD |
| $S_2W_2N_1$ | 4.67 ±0.34fgA | 3.80 ±0.48cdB | 3.34 ±0.07cBC | 2.88 ±0.13bC |
| $S_2W_3N_2$ | 4.19 ±0.31gA  | 3.47 ±0.23deB | 2.66 ±0.1dC   | 2.27 ±0.12cD |

分析下层土壤蔗糖酶活性（表 13），总体上，移栽 30 d 和移栽 51 d 时，高施氮量的 3 个处理的蔗糖酶活性均处于较高水平；移栽 67 d 和 89 d 时，秸秆埋深 20 cm 的 3 个处理与  $S_2W_2N_1$  处理均处于较高水平。相同处理的下层土壤蔗糖酶活性均呈显著下降的趋势（ $P<0.05$ ），降幅为 31.07%~66.69%，移栽 89 d 时的蔗糖酶活性均显著低于移栽 30 d 的蔗糖酶活性

( $P<0.05$ )。对比不同测试期下层土壤蔗糖酶活性影响因素显著性(表 14), 移栽 30 d 和 51 d 时, 下层蔗糖酶活性的影响主次顺序依次为: 施氮量> 秸秆埋深> 灌水量, 施氮量及移栽 51 d 的秸秆埋深影响显著( $P<0.05$ ); 移栽 67 d 和 89 d 时, 下层蔗糖酶活性的影响主次顺序发生变化为: 秸秆埋深> 施氮量> 灌水量, 其中秸秆埋深和移栽 67 d 时施氮量的影响极显著( $P<0.01$ ), 移栽 89 d 的施氮量影响显著( $P<0.05$ ); 灌水量在各测试期的影响不显著( $P>0.05$ )。分析得到下层土壤蔗糖活性的最优组合同样为  $S_1W_2N_1$  处理, 秸秆埋深 20 cm 亦对下层土壤蔗糖酶有提升作用。

表 13 下层土壤蔗糖酶活性

| Table 13 Sucrase activity in the lower soil mg/g |              |               |               |               |
|--------------------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 处理                                               | 移栽 30 d      | 移栽 51 d       | 移栽 67 d       | 移栽 89 d       |
| $S_0W_1N_1$                                      | 4.15±0.23aA  | 3.19±0.30abB  | 2.24±0.06bcdC | 1.38±0.18cdeD |
| $S_0W_2N_2$                                      | 3.60±0.15bcA | 2.49±0.26cdB  | 1.63±0.07eC   | 1.23±0.12deD  |
| $S_0W_3N_3$                                      | 2.89±0.25dA  | 2.25±0.10dB   | 1.57±0.05eC   | 1.15±0.19eD   |
| $S_1W_1N_2$                                      | 3.26±0.12cA  | 2.89±0.32abcA | 2.45±0.09abcB | 2.10±0.24bB   |
| $S_1W_2N_3$                                      | 3.77±0.2bA   | 3.17±0.45abB  | 2.71±0.26abBC | 2.24±0.07bC   |
| $S_1W_3N_1$                                      | 3.72±0.19bA  | 3.31±0.35aAB  | 2.91±0.23aBC  | 2.57±0.04aC   |
| $S_2W_1N_3$                                      | 2.50±0.01eA  | 2.21±0.04dB   | 1.86±0.08dC   | 1.51±0.18cdD  |
| $S_2W_2N_1$                                      | 3.55±0.26bcA | 3.09±0.24abAB | 2.69±0.23abAB | 2.35±0.18abB  |
| $S_2W_3N_2$                                      | 3.45±0.20bcA | 2.76±0.23bcB  | 2.04±0.17cdeC | 1.63±0.16cdD  |

表 14 不同测试期上、下层土壤蔗糖酶活性影响因素显著性分析

Table 14 Significant analysis of influencing factors of soil sucrase activity in upper and lower soil during different testing periods

| 因素   | 移栽 30 d |       | 移栽 51 d |       | 移栽 67 d |       | 移栽 89 d |       |
|------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
|      | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    |
| 秸秆埋深 | 0.015   | 0.064 | 0.047   | 0.035 | 0.037   | 0.005 | 0.010   | 0.007 |
| 灌水量  | 0.085   | 0.074 | 0.227   | 0.084 | 0.095   | 0.052 | 0.092   | 0.084 |
| 施氮量  | 0.031   | 0.040 | 0.130   | 0.025 | 0.036   | 0.008 | 0.041   | 0.026 |

## 2.5 秸秆隔层及水氮管理对土壤过氧化氢酶活性的影响

分析上层土壤过氧化氢酶活性(表 15),  $S_1W_1N_2$  处理均为各测试期内的最大值, 显著高于其他处理( $P<0.05$ ); 而  $S_0W_3N_3$  处理和  $S_2W_3N_2$  处理的过氧化氢酶活性在各测试期均为最小值, 显著低于其他处理( $P<0.05$ )。相同处理的上层过氧化氢酶总体呈先上升后下降的趋势, 但差异显著性不尽相同。分析不同测试期的影响因素显著性(表 17), 上层土壤过氧化氢酶的影响因素主次顺序依次为: 秸秆埋深> 灌水量> 施氮量, 其中秸秆埋深和灌水量的影响显著( $P<0.05$ ), 移栽 30 d 和 51 d 秸秆埋深的影响达到极显著水平( $P<0.01$ ), 施氮量影响不显著( $P>0.05$ )。分析得到上层土壤过氧化氢酶活性的最优组合为  $S_1W_1N_2$  处理, 秸秆埋深 20 cm 配合高

灌水量可显著提升上层土壤过氧化氢酶活性。

表 15 上层土壤过氧化氢酶活性

| Table 15 Catalase activity in the upper soil mL/g |              |               |              |              |
|---------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| 处理                                                | 移栽 30 d      | 移栽 51 d       | 移栽 67 d      | 移栽 89 d      |
| $S_0W_1N_1$                                       | 7.75±0.14bcB | 8.15±0.01bcA  | 7.90±0.13eAB | 7.18±0.31dC  |
| $S_0W_2N_2$                                       | 7.11±0.10cB  | 7.31±0.11dA   | 7.07±0.12fB  | 6.46±0.01eC  |
| $S_0W_3N_3$                                       | 6.33±0.32dAB | 6.72±0.20eA   | 6.55±0.14gAB | 6.12±0.27eB  |
| $S_1W_1N_2$                                       | 9.09±0.64aC  | 10.01±0.31aAB | 10.49±0.18aA | 9.45±0.22aBC |
| $S_1W_2N_3$                                       | 8.29±0.89bA  | 8.56±0.14bA   | 9.12±0.19bA  | 8.64±0.18bA  |
| $S_1W_3N_1$                                       | 7.79±0.08bcC | 8.16±0.06bcB  | 8.46±0.10cA  | 7.81±0.13cC  |
| $S_2W_1N_3$                                       | 7.24±0.25cB  | 7.74±0.07cdAB | 8.17±0.07dA  | 7.80±0.50cAB |
| $S_2W_2N_1$                                       | 6.34±0.25dB  | 6.79±0.62eAB  | 7.33±0.26fA  | 7.30±0.13dA  |
| $S_2W_3N_2$                                       | 6.08±0.19dB  | 6.49±0.22eA   | 6.51±0.05gA  | 6.3±0.24eAB  |

下层土壤过氧化氢酶活性见表 16, 秸秆埋深 20 cm 的 3 个处理各测试期中均处于较高水平, 且  $S_1W_3N_1$  处理的过氧化氢酶活性均为各测试期的最大值, 显著高于其他处理( $P<0.05$ ); 而秸秆表层覆盖的 3 个处理在测试期内均处于较低水平,  $S_0W_3N_3$  处理的过氧化氢酶活性均为各测试期的最小值, 显著低于其他处理( $P<0.05$ )。相同处理的下层土壤过氧化氢酶活性随时间并无显著变化( $P>0.05$ )。对比不同测试期下层土壤过氧化氢酶活性影响因素显著性(表 17), 其影响因素主次顺序依次为: 秸秆埋深> 施氮量> 灌水量, 秸秆埋深和施氮量的影响极显著( $P<0.01$ ), 灌水量则无显著影响( $P>0.05$ )。分析得到下层土壤过氧化氢酶活性的最优组合为  $S_1W_2N_1$  处理, 秸秆埋深 20 cm 配合高施氮量显著提升下层土壤过氧化氢酶活性。

表 16 下层土壤过氧化氢酶活性

| Table 16 Catalase activity in the lower soil mL/g |              |              |              |             |
|---------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 处理                                                | 移栽 30 d      | 移栽 51 d      | 移栽 67 d      | 移栽 89 d     |
| $S_0W_1N_1$                                       | 4.06±0.14cA  | 4.16±0.13cA  | 4.23±0.13cA  | 4.02±0.12cA |
| $S_0W_2N_2$                                       | 3.71±0.13dA  | 3.77±0.13deA | 3.85±0.1deA  | 3.65±0.10dA |
| $S_0W_3N_3$                                       | 3.28±0.16eA  | 3.33±0.17fA  | 3.42±0.16fA  | 3.27±0.15eA |
| $S_1W_1N_2$                                       | 4.86±0.11bA  | 4.95±0.10bA  | 5.06±0.11bA  | 4.86±0.13bA |
| $S_1W_2N_3$                                       | 4.68±0.17bA  | 4.78±0.16bA  | 4.83±0.17bA  | 4.65±0.19bA |
| $S_1W_3N_1$                                       | 5.50±0.24aA  | 5.62±0.26aA  | 5.70±0.21aA  | 5.46±0.21aA |
| $S_2W_1N_3$                                       | 3.67±0.21dA  | 3.72±0.21eA  | 3.79±0.21eA  | 3.62±0.19dA |
| $S_2W_2N_1$                                       | 4.78±0.15bA  | 4.87±0.14bA  | 4.96±0.14bA  | 4.74±0.14bA |
| $S_2W_3N_2$                                       | 3.97±0.20cdA | 4.03±0.20cdA | 4.10±0.18cdA | 3.94±0.18cA |

表 17 不同测试期上、下层土壤

过氧化氢酶活性影响因素显著性分析

Table 17 Significant analysis of influencing factors of soil catalase activity in upper and lower soil during different testing periods

| 因素   | 移栽 30 d |       | 移栽 51 d |       | 移栽 67 d |       | 移栽 89 d |       |
|------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
|      | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    | 上层      | 下层    |
| 秸秆埋深 | 0.006   | 0.003 | 0.004   | 0.002 | 0.015   | 0.005 | 0.019   | 0.004 |
| 灌水量  | 0.012   | 0.122 | 0.006   | 0.087 | 0.030   | 0.192 | 0.044   | 0.182 |
| 施氮量  | 0.449   | 0.006 | 0.149   | 0.004 | 0.843   | 0.009 | 0.857   | 0.009 |

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆隔层及水氮管理对土壤氮元素量的影响

随着番茄生育期推进, 上层土壤铵态氮和硝态氮量随时间呈显著下降趋势 ( $P<0.05$ ), 下层土壤铵态氮和硝态氮量呈显著上升趋势 ( $P<0.05$ ), 这可能与铵态氮和硝态氮随水分向深层土壤的淋溶过程有关<sup>[28]</sup>。上层土壤的铵态氮和硝态氮量的影响主次顺序均为: 施氮量>秸秆埋深>灌水量, 其中施氮量和秸秆埋深在大部分测试期的影响都达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 高施氮量和秸秆埋深 20 cm 处理上层土壤铵态氮和硝态氮量显著高于其他处理 ( $P<0.05$ ), 增加施氮量能显著提升上层土壤的铵态氮和硝态氮量, 秸秆埋深 20 cm 则进一步增强提升效果。分析其原因, 可能是增加施氮量, 引入更多氮素, 必然明显提升土壤中铵态氮量和硝态氮量; 秸秆埋深 20 cm 的保水保肥效果较佳, 有效阻滞水分和养分下渗, 使更多铵态氮和硝态氮滞留在上层土壤中。笔者所在课题组前期研究发现, 秸秆埋深 20 cm 时上层土壤含水率较表层覆盖提高了 10.5%, 秸秆埋深 30 cm 则提高了 4.6%<sup>[29]</sup>。灌水量对上层铵态氮和硝态氮的影响均不显著 ( $P>0.05$ ), 在秸秆埋深 20 cm 和增加施氮量的条件下, 降低 20%灌水量时上层土壤无机氮量依然维持在最优水平, 表明了秸秆埋深 20 cm 起到一定节水灌溉的效果。

下层土壤的铵态氮和硝态氮量的影响主次顺序均为: 灌水量>施氮量>秸秆埋深, 灌水量和施氮量在大部分的测试期时影响显著 ( $P<0.05$ )。显然, 增加灌水量使更多水分下渗至下层土壤, 配合增加施氮量, 促使更多无机氮向下运移, 提升下层土壤铵态氮和硝态氮量。对比发现, 施氮量对下层土壤铵态氮达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 而对下层土壤硝态氮影响不显著 ( $P>0.05$ ), 施氮量对铵态氮的影响比对硝态氮的影响更大。这可能是铵态氮中  $\text{NH}_4^+$  为阳离子, 与大部分土壤胶体电性相反, 更多数量的铵态氮被吸附在上层土壤中, 下渗数量有所减少。改变施氮量, 淋溶至下层土壤的铵态氮量随之变化, 且变化幅度相对明显; 而硝态氮中  $\text{NO}_3^-$  为阴离子, 与大部分土壤胶体电性相同, 彼此发生排斥, 更易下渗至下层土壤中, 改变施氮量对下层土壤硝态氮量变化影响程度相对较小。

#### 3.2 秸秆隔层及水氮管理对土壤酶活性的影响

尿素在脲酶的作用下分解成铵态氮方能被作物吸收利用, 脲酶活性可反映尿素分解成铵态氮的快慢, 是衡量供氮能力的重要指标<sup>[20]</sup>。对比分析上、下层土壤脲酶活性和铵态氮量, 上层土壤中,  $\text{S}_1\text{W}_3\text{N}_1$

处理和  $\text{S}_1\text{W}_1\text{N}_2$  处理的脲酶活性与铵态氮量在各测试期内均为较高水平,  $\text{S}_0\text{W}_3\text{N}_3$  处理和  $\text{S}_2\text{W}_1\text{N}_3$  处理则均为较低水平, 表明上层土壤脲酶活性与铵态氮量之间存在关联, 提升土壤脲酶活性能促进尿素分解成铵态氮, 提高铵态氮量。下层土壤脲酶活性与铵态氮量之间无明显规律。这可能是下层土壤铵态氮主要来源于上层土壤铵态氮随水分下渗, 下层土壤经脲酶作用, 尿素水解成的铵态氮量较少, 因此二者无明显关联。研究结果显示, 上、下层土壤脲酶活性均在 51 d 之后显著上升 ( $P<0.05$ ), 与前人研究结果相似<sup>[30]</sup>。这可能因为番茄从移栽 30 d (苗期) 到移栽 51 d (花期), 番茄生长处于最旺盛的阶段, 大量消耗土壤养分, 番茄根系和微生物集中的上层土壤无机氮量显著降低 ( $P<0.05$ ), 造成番茄与微生物竞争养分, 抑制了微生物的生长与繁殖<sup>[30]</sup>; 为保证番茄正常生长, 促进番茄开花与坐果, 在移栽 52 d 进行一次灌溉和施肥, 土壤养分有所提升, 脲酶活性随之增强; 坐果期和收获期, 番茄对养分的吸收有所减少, 土壤脲酶活性进一步增强。蔗糖酶活性是土壤中微生物和根系活动强度的重要指标。研究发现, 上、下层土壤蔗糖酶活性随番茄生育期推进均显著下降 ( $P<0.05$ )。分析其原因, 可能是: 首先, 随着番茄生育期的推进, 土壤中营养物质逐渐被吸收和利用, 微生物生长与繁殖所需营养物质不足, 导致微生物的数量减少, 其分泌的酶随之减少; 其次, 番茄根系逐渐发育完全, 根系活力下降, 根系分泌的酶也相应减少<sup>[31]</sup>。两方面共同影响, 蔗糖酶活性显著下降。过氧化氢酶可分解植物根系呼吸作用产生的过氧化氢, 防止其对作物根系产生毒害作用, 其与根系呼吸强度密切相关<sup>[32]</sup>。研究结果表明, 上层土壤过氧化氢酶活性随时间总体呈先上升后下降趋势, 在移栽 51 d 或 67 d 达到峰值。其原因可能是番茄生育前期, 番茄根系生长旺盛, 呼吸强度高, 产生大量过氧化氢等有害物质, 激发过氧化氢酶活性; 随着番茄生育期推进, 番茄根系逐渐发育完全, 根系活性减弱, 因根系呼吸而产生的过氧化氢减少, 过氧化氢酶活性减弱。

秸秆埋深是上、下层土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性的主要影响因素, 在大部分测试期内均达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 个别测试期甚至达极显著水平 ( $P<0.01$ )。秸秆埋深 20 cm 可显著提升上、下层土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。土壤酶主要来源于微生物和植物根系的分泌物<sup>[33]</sup>, 秸秆埋深 20 cm 具有较优的保水保肥作用, 改善土壤水肥条件, 促进根系和微生物生长与活动, 促使其分泌物增加, 从而提升脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。此外, 灌水量对上、下层土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性的影响均不

显著 ( $P>0.05$ )，可能是因为秸秆还田的保水作用使上、下层土壤含水率和养分量维持在较优水平，灌溉水减量 20% 对尿素分解、微生物增殖和番茄根系生长影响均较小，也表明了秸秆还田具有一定的节水灌溉的作用。

## 4 结 论

1) 施氮量和秸秆埋深显著影响上层土壤铵态氮和硝态氮量 ( $P<0.05$ )，高施氮量和秸秆埋深 20 cm 可显著提升上层土壤铵态氮和硝态氮量 ( $P<0.05$ )；灌水量对下层土壤的铵态氮和硝态氮量影响显著 ( $P<0.05$ )，增加灌水量有利于上层土壤铵态氮和硝态氮向下层土壤运移；秸秆埋深对上下层土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均影响显著 ( $P<0.05$ )，秸秆埋深 20 cm 可有效提升上、下层土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。

2) 秸秆埋深 20 cm 具有较优的保水保肥作用；综合考虑铵态氮量、硝态氮量、脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性、作物生长特点和节水需求等因素，在当前水肥管理模式（施氮量 180~270 kg/hm<sup>2</sup>，灌水量 80% $I_w$ ~120% $I_w$ ）下，秸秆埋深 20 cm，灌水量 80% $I_w$ ，施氮量 270 kg/hm<sup>2</sup>，即 S<sub>1</sub>W<sub>3</sub>N<sub>1</sub> 处理为最优组合。

## 参考文献：

- [1] 中华人民共和国生态环境部，国家统计局，中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[R]. 2020.  
Ministry of Ecology and Environment, PRC, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC. Bulletin of the second national survey of pollution sources[R]. 2020.
- [2] 霍丽丽，姚宗路，赵立欣，等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 349-359.  
HUO Lili, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 349-359.
- [3] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.  
WANG Guiliang. Quantitative analysis of reactive nitrogen losses and nitrogen use efficiency of three major grain crops in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [4] 李昊昱，孟兆良，庞党伟，等. 周年秸秆还田对农田土壤固碳及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 893-903.  
LI Haoyu, MENG Zhaoliang, PANG Dangwei, et al. Effect of annual straw return model on soil carbon sequestration and crop yields in winter wheat-summer maize rotation farmland[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(6): 893-903.
- [5] HUANG T T, YANG N, LU C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 214: 105 171.

- [6] 郑浣彤，邵玺文，耿艳秋，等. 秸秆还田与氮肥运筹对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 29-36.  
ZHENG Huantong, SHAO Xiwen, GENG Yanqiu, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on rice yield and nitrogen utilization[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 29-36.
- [7] 张寅，鄂继芳，孙明海. 秸秆覆盖对沟灌夏玉米根系分布及产量影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 16-21.  
ZHANG Yin, E Jifang, SUN Minghai. The effect of straw mulching coupled with furrow irrigation on root distribution and yield of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 16-21.
- [8] 张万锋，杨树青，靳亚红，等. 秸秆深埋下灌水量对土壤水盐分布与夏玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 228-237.  
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, JIN Yahong, et al. Effects of irrigation amount on soil water and salt distribution and summer maize yield under deeply buried straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 228-237.
- [9] 吴烽，张林瑄，郭相平，等. 秸秆隔层及不同灌水上限对土壤水氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 73-78.  
WU Feng, ZHANG Shuxuan, GUO Xiangping, et al. Effects of straw interlayers and different irrigation limits on soil water and nitrogen distribution[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 73-78.
- [10] 仲昭易，张瑜，冯绍元，等. 秸秆深埋结合地膜覆盖土壤水盐运移模拟试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 25-30.  
ZHONG Zhaoyi, ZHANG Yu, FENG Shaoyuan, et al. Incorporating straw coupled with film mulching to Ameliorate soil salinization[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 25-30.
- [11] 刘芳，张长生，陈爱武，等. 秸秆还田技术研究及应用进展[J]. 作物杂志, 2012(2): 18-23.  
LIU Fang, ZHANG Changsheng, CHEN Aiwu, et al. Technology research and application prospect of straw returning[J]. Crops, 2012(2): 18-23.
- [12] 陈云峰，夏贤格，杨利，等. 秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 299-307.  
CHEN Yunfeng, XIA Xian'ge, YANG Li, et al. Straw return is the realistic way of straw resource utilization[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6): 299-307.
- [13] 韩锦泽. 玉米秸秆还田深度对土壤有机碳组分及酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.  
HAN Jinze. Effects of maize straw returned depths on soil organic carbon fractions and enzyme activities[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [14] 孙秀娟. 秸秆集中掩埋还田对赤霉病菌(Fusarium graminearum Seh.)和二化螟(Chilo suppressalis Walker)幼虫存活的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.  
SUN Xiujian. Effects of straw centralize-buried in soil on suetval dynamics of phytoalexin (fusarium graminearum seh.) and stem-borer (chilo suppressalis walker) larvae[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [15] 李芙蓉，杨劲松，吴亚坤，等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1 101-1 107.  
LI Furong, YANG Jinsong, WU Yakun, et al. Effects of straw mulch at different depths on water-salt dynamic changes of coastal saline soil in north Jiangsu Province[J]. Soils, 2013, 45(6): 1 101-1 107.
- [16] ZHAO Y G, WANG S J, LI Y, et al. Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield[J]. Geoderma, 2019, 352: 13-21.

- [17] ZHAO Y G, LI Y Y, WANG J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 363-370.
- [18] 张国伟, 王晓婧, 杨长琴, 等. 前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(9): 1 493-1 501.  
ZHANG Guowei, WANG Xiaojing, YANG Changqin, et al. Effects of rotational pattern and fertilization application on soybean yield under straws returning of preceding crop[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1 493-1 501.
- [19] 白伟, 张立祯, 逢焕成, 等. 秸秆还田配施氮肥对春玉米水氮利用效率的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(2): 224-231.  
BAI Wei, ZHANG Lizhen, PANG Huancheng, et al. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on water use efficiency and nitrogen use efficiency of spring maize in northeast China[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(2): 224-231.
- [20] 莫宇, 高峰, 王宇, 等. 不同施氮条件下再生水灌溉对土壤理化性质及脲酶活性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 95-100.  
MO Yu, GAO Feng, WANG Yu, et al. Changes in soil physicochemical properties and urease activity as affected by reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(1): 95-100.
- [21] 王顺, 尹娟, 张海军, 等. 不同水氮处理对马铃薯土壤酶活性和产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2021(8): 67-73.  
WANG Shun, YIN Juan, ZHANG Haijun, et al. Effects of different water and nitrogen treatments on soil enzyme activity and yield of potato[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(8): 67-73.
- [22] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(9): 1 741-1 749.  
WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(9): 1 741-1 749.
- [23] 徐忠山, 刘景辉, 逯晓萍, 等. 秸秆颗粒还田对黑土土壤酶活性及细菌群落的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4 347-4 355.  
XU Zhongshan, LIU Jinghui, LU Xiaoping, et al. Effects of returning granulated corn stover on soil enzyme activities and bacterial community in black soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4 347-4 355.
- [24] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 40-44, 62.  
WANG Jun, WANG Dejian, ZHANG Gang, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 40-44, 62.
- [25] 樊俊, 谭军, 王瑞, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对植烟土壤养分、酶活性及微生物多样性的影响[J]. *烟草科技*, 2019, 52(2): 12-18, 61.  
FAN Jun, TAN Jun, WANG Rui, et al. Effects of straw returning and decomposed organic manure on soil nutrient contents, enzyme activities and microbial diversity for tobacco-planting[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2019, 52(2): 12-18, 61.
- [26] 萨如拉, 杨恒山, 范富, 等. 秸秆还田量和腐熟剂对秸秆降解率和土壤理化性质的影响[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(9): 56-61.  
SA Rula, YANG Hengshan, FAN Fu, et al. Effect of amount of straw returning to field and straw-decomposing inoculant on degradation rate of straw and soil physicochemical properties[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(9): 56-61.
- [27] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 65-73.  
YANG Xianlong, LU Yongli, TONG Yan'an, et al. Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 65-73.
- [28] 李宗新, 董树亨, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 65-70.  
LI Zongxin, DONG Shuting, WANG Kongjun, et al. Soil nutrient leaching patterns in maize field under different fertilizations: An in situ study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 65-70.
- [29] 曹克文. 秸秆隔层及水肥管理对番茄和芥菜产量、品质及水氮利用的影响[D]. 南京: 河海大学, 2021.  
CAO Kewen. Effect of straw interlayer with water and fertilizer management on yield, quality, water and nitrogen utilization of tomato and mustard[D]. Nanjing: Hohai University, 2021.
- [30] 巩闪闪, 刘晓静, 张志勇, 等. 不同施氮措施对冬小麦农田土壤酶活性和氮转化的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(11): 2 215-2 222.  
GONG Shanshan, LIU Xiaojing, ZHANG Zhiyong, et al. Effect of different nitrogen application measures on soil enzyme activities and nitrogen turnover in winter wheat cropland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(11): 2 215-2 222.
- [31] 罗珠珠, 黄高宝, 蔡立群, 等. 不同耕作方式下春小麦生育期土壤酶时空变化研究[J]. *草业学报*, 2012, 21(6): 94-101.  
LUO Zhuzhu, HUANG Gaobao, CAI Liqun, et al. Temporal and spatial disparities of soil enzyme activities during the spring wheat growing season under different tillage systems[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(6): 94-101.
- [32] 王庆宇. 燕麦与不同作物间作对土壤特性及微生物群落结构的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.  
WANG Qingyu. Effects of intercropping oats on soil properties and soil microbial community structure[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [33] 林玥, 郝嘉琪, 王维钰, 等. 不同耕作措施对黄土高原区域大豆根际土壤微生物量、酶活性和养分的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(4): 620-630.  
LIN Yue, HAO Jiaqi, WANG Weiyu, et al. Effects of different tillage measures on soil microbial biomass, enzyme activities and nutrients in rhizosphere soil of the loess plateau[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, 28(4): 620-630.

## The Effects of Straw Incorporation Depth on Nitrogen Dynamics and Enzymatic Activities in Soil

CHEN Sheng<sup>1</sup>, HUANG Da<sup>1,2,3\*</sup>, ZHANG Erzi<sup>4</sup>, ZHU Jianbin<sup>1</sup>, GUO Xiangping<sup>1</sup>

(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Architecture Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

3. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin 541004, China;

4. Nanjing Jiangning Water Authority, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** **【Objective】** It has been a consensus that adding organic matter such as crop straws to soil not only improves soil fertility and soil structure but also boosts enzymatic activity and nutrient cycling. However, what is the optimal way of amending soil with straws is poorly understood. The purpose of this paper is to fill this knowledge gap by systematically studying the effects of incorporating straws into different soil depths on nitrogen mineralization and enzymatic activity at different growth stages of tomato. **【Method】** The plot experiment was conducted in a tomato field, with the straw incorporated over the soil surface, at the depth 20 cm and 30 cm, respectively. For each straw incorporation, there were three irrigation treatments – irrigating 80%, 100% and 120% of water measured from an evaporation pan, and three nitrogen fertilizations: 180 kg/hm<sup>2</sup>, 225 kg/hm<sup>2</sup>, 270 kg/hm<sup>2</sup>. During the experiment, we measured the content of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, as well as the activities of urease, sucrase and catalase in the soil at different growing stages. **【Result】** The contents of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in the upper soil decreased with time ( $P<0.05$ ), while in the subsoil they increased with time ( $P<0.05$ ). As time elapsed, the activity of urease in the upper soil declined first followed by an increase, both significantly ( $P<0.05$ ), while in the subsoil it remained unchanged initially followed by an increase ( $P<0.05$ ). In contrast, the activity of sucrase in the soil profile decreased with time ( $P<0.05$ ), and the activity of catalase remained the same ( $P>0.05$ ). Nitrogen fertilization and straw incorporation depth combined to affect the contents of ammonium and nitrate in the upper soil ( $P<0.05$ ), with high nitrogen application combined with straw burial depth of 20 cm increased the contents of ammonium and nitrate nitrogen in the upper soil most ( $P<0.05$ ). Irrigation amount affected the contents of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in the lower soil ( $P<0.05$ ), and increasing irrigation amount benefited the downward movement of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N. The buried depth of straw had significant effects on the activity of urease, sucrase and catalase in both upper and lower soil ( $P<0.05$ ), and the burial depth of 20 cm improved the activities of urease, sucrase and catalase significantly, compared to other treatments. **【Conclusion】** Straw burial depth, irrigation and nitrogen fertilization combined to affect the dynamics of soil water and nutrient, as well as enzymatic activity. Considering mineral nitrogen, enzymatic activity, crop growth and water saving, burying the straw at the depth of 20 cm, combined with irrigating 80% of water measured from a pan and nitrogen application of 270 kg/hm<sup>2</sup> was the optimal agronomic practice for tomato production in the studied area.

**Key words:** soil amendment; straw incorporation; soil nitrate and ammonium; urease; sucrase; catalase

责任编辑: 赵宇龙