# 不同耕作方式对绿洲区夏玉米农田土壤呼吸及酶活性的影响

伏星舟[1,2]，王 立[1]，杨彩红[1]，王军强[3]，施志国[3]，李彦荣[3]

(1. 甘肃农业大学 林学院，甘肃 兰州 730000；
2. 古蔺县林业局，四川 泸州 646500；3. 甘肃省农业工程技术研究院，甘肃 武威 733006)

**摘 要**：[目的] 研究民勤荒漠绿洲区免耕($T_n$)、少耕($T_m$)、深松($T_s$)和秋翻($T_f$)4 种耕作方式下土壤呼吸速率的动态变化及其与土壤酶活性的关系，为制定科学有效的土壤碳调控管理措施提供依据。[方法] 在 2 a 的田间定位试验基础上，利用 LI-8100 土壤碳通量测量系统测定不同生育时期(苗期、抽穗期和成熟期)玉米田土壤呼吸速率动态变化，同时取 0—20 cm 土样测定土壤酶活性和理化性质。[结果] ①民勤荒漠绿洲区土壤呼吸具有典型的日动态变化，4 种耕作措施土壤呼吸速率日变化在玉米整个生育期呈单峰曲线变化，土壤呼吸速率依次为：$T_f > T_m > T_s > T_n$，有机碳含量与土壤呼吸速率呈显著正相关($p<0.05$)，说明在民勤荒漠绿洲区，传统耕作明显加快了玉米农田土壤碳的释放。②土壤脲酶、蔗糖酶、蛋白酶、过氧化氢酶和 β-葡萄糖苷酶活性与土壤呼吸有较好相关性($p<0.05$)，其中与过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶活性达到极显著水平($p<0.01$)；pH 值、速效钾、有机碳与脲酶、蔗糖酶、β-葡糖糖苷酶活性达到极显著水平($p<0.01$)。[结论] 耕作方式可以通过改变荒漠绿洲区土壤理化性质、激发酶活性从而使土壤呼吸速率发生不同程度的改变，影响玉米田 $CO_2$ 的释放。

**关键词**：耕作；绿洲区；土壤呼吸；酶活性；理化性质

**文献标识码**：A **文章编号**：1000-288X(2018)05-0103-06 **中图分类号**：S153

**文献参数**：伏星舟，王立，杨彩红，等. 不同耕作方式对绿洲区夏玉米农田土壤呼吸及酶活性的影响[J]. 水土保持通报，2018，38(5)：103-108. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2018. 05. 017. Fu Xingzhou, Wang Li, Yang Caihong, et al. Effects of different cultivation on soil respiration and enzyme activity of summer maize in oasis region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 103-108.

# Effects of Different Cultivation on Soil Respiration and Enzyme Activity of Summer Maize in Oasis Region

FU Xingzhou[1,2], WANG Li[1], YANG Caihong[1], WANG Junqiang[3], SHI Zhiguo[3], LI Yanrong[3]

(1. *College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*; 2. *Gulin Forestry Bureau, Luzhou, Sichuan* 646500, *China*; 3. *Gansu Academy of Agricultural Engineering Technology, Wuwei, Gansu* 733006, *China*)

**Abstract**: [Objective] The dynamic changes of soil respiration rate and their relationships with soil enzyme activities under 4 different tillage methods of no tillage ($T_n$), medium tillage ($T_m$), subsoiling ($T_s$) and fall turnover ($T_f$) were studied in Minqin desert oasis, to provide basis for the establishment of feasible soil carbon management measures. [Methods] Based on a 2-years field experiment, the soil respiration rate in different growth stages (seedling, heading and maturity stage) was measured by LI-8100 soil carbon flux measurement system. Soil enzyme activities and physicochemical properties were measured by collecting soil samples at 0—20 cm soil depths. [Results] (1) Oasis soil respiration in Minqin desert showed a typical diurnal variation. The diurnal variation of soil respiration rate of the four tillage showed a single peak curve

**收稿日期**：2018-01-04 **修回日期**：2018-04-17

**资助项目**：国家自然科学基金项目“荒漠绿洲区保护性耕作多熟轮作的防风蚀效应”(41561062)，“不同耕作方式下民勤荒漠绿洲区土壤有机碳的稳定性及风蚀效应”(31560170)；甘肃省科技计划(17YF1FH101)；甘肃省高等学校科研项目(2017A-030)

**第一作者**：伏星舟(1992—)，男(汉族)，甘肃省定西市人，硕士研究生，研究方向为保护性耕作对土壤风蚀的影响。E-mail：1614669096@qq. com。

**通讯作者**：王立(1963—)，男(汉族)，甘肃省甘谷县人，博士，主要从事水土保持、保护性耕作和荒漠化防治的教学与科研工作。E-mail：wangli@gsau. edu. cn。

in the whole growth period of maize. The soil respiration rate were ranked as: $T_f > T_m > T_s > T_n$. There was a significant positive correlation between organic carbon content and soil respiration rate ($P<0.05$), indicating that traditional tillage significantly accelerated the release of soil carbon from maize fields in Minqin desert oasis area. (2) The activities of soil urease, invertase, protease, catalase and beta glucosidase were significantly correlated with soil respiration ($p<0.05$). The pH value, available potassium, organic carbon and the activity of urease, invertase glucose and beta glycosidase reached an extremely significant level ($p<0.01$). [Conclusion] Different tillage can change soil respiration rate by changing the physical and chemical properties of soil and stimulate enzyme activity in the desert oasis area, thus, influence the release of $CO_2$ in summer maize field.

**Keywords: tillage; oasis region; soil respiration; enzyme activity; physicochemical properties**

土壤呼吸(soil respiration, Rs)指的是未受扰动的土壤中产生 $CO_2$ 的所有代谢过程，主要由土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸、植物根呼吸及土壤有机碳分解产生[1]。孟凡桥等[2]研究认为农田管理对农田 $CO_2$ 的释放具有明显的影响，相应的土地利用方式(如耕作、排灌条件的改变等)对于土壤呼吸的影响也十分显著[3-4]。这就意味着不同耕作方式在改变土壤透气性、土壤有机碳含量、微生物的组成和活性的同时，土壤呼吸也发生不同程度的改变[5]。

土壤呼吸不仅表征土壤有机碳周转、土壤质量和肥力、能力流动[6]等一些生物学指标，同时还能反映土壤微生物的总体活性和土壤物质代谢的强度[7]。土壤酶参与了土壤中的一切生物化学反应[8]，而土壤微生物呼吸实质上就是土壤中的微生物分解有机碳的反应[9-10]，所以土壤酶活性与土壤呼吸之间必然存在一定联系，故研究土壤酶对土壤微生物呼吸有重要的作用。目前，关于土壤酶活性与土壤微生物呼吸的研究，主要集中在不同化学农药和肥力水平等方面，但从不同耕作方式的研究，尤其是民勤荒漠绿洲区农田土壤呼吸与土壤酶活性的变化研究相对较少。

因此，本试验拟通过研究不同耕作方式对民勤绿洲区夏玉米田土壤呼吸的影响，探究不同耕作措施下参与碳、氮循环的土壤酶活性变化，旨在从生物化学角度反映不同耕作方式对土壤碳循环转变过程，补充完善荒漠绿洲区土壤呼吸排放机理、评估区域碳收支平衡及为制定科学有效的土壤碳调控管理措施提供依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 实验设计

试验区位于甘肃省民勤绿洲区的民勤县苏武乡泉水村(103°07′16″E, 33°37′10″N)，属典型的温带干旱荒漠气候区，海拔在 1 298～1 936 m，平均海拔 1 400 m，冬季寒冷夏季炎热，昼夜温差可达 25.2 ℃，多年均温 7.8 ℃，年日照时间长，年均无霜期 162 d，光照量大而充足，日照时数达到了 3 073.5 h，全年的平均日照时数为 2 799.40 h。该地平均年降水量在 113.2 mm 左右，蒸发量高达 2 644 mm，降水主要在分布在 7，8，9 这 3 个月，干燥度大于 5.5，为全国最干旱，风蚀最为严重的地区之一。耕作土壤为当地区开垦种植早、熟化程度高的灌淤土，厚度可达 30～60 cm，耕层质地轻，土性热，保肥、保水性差。

试验始于 2015 年 10 月，共设 4 个耕作方式处理(秋翻、少耕、深松和免耕)，每个处理设置 3 个重复，各处理小区面积介于 12～24.75 $hm^2$，随机区组排列。试验设计共 4 个处理：①免耕($T_n$)，对土地不做耕翻，地膜一直到实验结束才更换；②秋翻($T_f$)，包括每年秋收后耕翻土地，翻动土层深度大约为 20 cm，春季旋耕 7.5～10 cm 整地、覆膜、播种等田间作业；③少耕($T_m$)，收获后到播种前不搅动土壤，播种前 1 周左右进行旋耕整地 7.5～10 cm、覆膜、播种；④深松($T_s$)，秋收后利用深松铲对耕地进行耕翻 30 cm，春季旋耕整地、覆膜、播种。

种植作物统一为玉米，品种为‘甘鑫 2818’，播种时间为 4 月 20 日，株距 20 cm，行距 30 cm，定植 7.2 $\times 10^4$ 株/$hm^2$。采用统一的施肥措施，所施用化肥为尿素、磷酸二胺、普钙、氯化钾，各处理化肥用量统一为每年施用 N 180 kg/$hm^2$，$P_2O_5$ 95～98 kg/$hm^2$。磷酸二胺、普钙、氯化钾全部基施，尿素基施 20%，拔节期至抽穗期追施 20%，抽穗期至开花期追施 10%，灌浆期追施 50%。整个生育期灌水 34.1～36.3 $m^3$/$hm^2$。免耕($T_n$)、少耕($T_m$)、深松($T_s$)和秋翻($T_f$)这 4 种不同耕作方式的玉米地的施肥、灌水、管理方式等均相同，仅在耕作方式上有差异。

## 1.2 测定方法

1.2.1 土壤呼吸测定 土壤呼吸通量采用 Li-8100 土壤碳通量自动测量系统测定。季节变化选择根据夏玉米主要生育阶段确定，应避开施肥和灌溉期，以 15 d 左右为宜。土壤呼吸测定分别在玉米出苗期(2017 年 6 月 29 日)、抽穗期(2017 年 8 月 4 日)、成熟期(2017 年 9 月 27 日)进行，每次测定在 8:00—20:00(每 2 h 测定一次)，要求在每次测定前一天，将地膜揭开呼吸室边缘大小的裸区，以排净膜内累积的

$CO_2$,且在每次测定前一天,在不扰动土壤和 PVC 环的前提下,从根部齐地剪除地上绿色植物并清除圈内枯落物。为减少在呼吸日变化中温度对试验的误差,我们采取顺序依次测量的方式进行轮回测定,通量值也会通过系统同步测定呼吸室内 $CO_2$ 体积分数、土壤温度、近地表空气温度和空气相对湿度等自动计算得出。

1.2.2　土壤酶活性及理化指标的测定　每月土壤呼吸测定后,在每个土壤呼吸观测点附近用钻土芯法采集土样。土钻直径为 4 cm,每个采样点取 0—20 cm 层次土样进行收集,每个观测点选 4 个采样点,将采集到的 4 个重复混合作为一个样品装入密封袋中,回实验室后自然风干后过筛。过筛后的土壤(<2 mm)用作土壤酶活性测定。蔗糖酶活性(invertase)用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定(24 h 后 1 g 土壤葡萄糖的毫克数表示),过氧化氢酶(cata-lase)用 $KMnO_4$ 滴定法测定,脲酶(urease)用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定(以 24 h 后 1 g 土壤中 $NH_3$-N 的毫克数表示),碱性磷酸酶(alkaline phosphatase)用磷酸苯二钠比色法测定,蛋白酶(protease)用茚三酮比色法测定,$\beta$-葡萄糖苷酶($\beta$-D-glucosidase)用硝基酚比色法测定[11-12]。

有机碳(soil organic carbon):铬酸氧化还原滴定稀释法;全氮(total nitrogen):用半微量凯氏定氮法;速效钾(quick-acting potassium)采用浸提火焰光度法;pH 值采用电位法[13]。

### 1.3　数据处理

实验所得数据统一先采用 Excel 2003 进行初步的整理,再通过 SPSS 22.0 统计分析软件对实验所得数据进行方差、相关性($p<0.05$)、差异显著性($p<0.05$)分析,最后由 Origin 8.0 统一绘图。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同耕作方式对土壤呼吸的影响

从图 1 可知,民勤荒漠绿洲区土壤呼吸日变化表现出较为平缓的单峰曲线,4 种耕作方式下,玉米田土壤呼吸速率波动规律基本一致。出苗期和成熟期土壤呼吸的峰值主要出现在 12:00 或 14:00,抽穗期土壤呼吸峰值主要出现在 14:00 或 16:00。不同生育期内的土壤呼吸的日变幅差异较大,其中在玉米苗期少耕($T_m$)处理下土壤呼吸的日变幅最大〔5.55～7.49 $\mu$mol/($m^2$ · s)〕,在玉米抽穗期深松($T_s$)处理下变幅最小〔3.43～3.99 $\mu$mol/($m^2$ · s)〕。

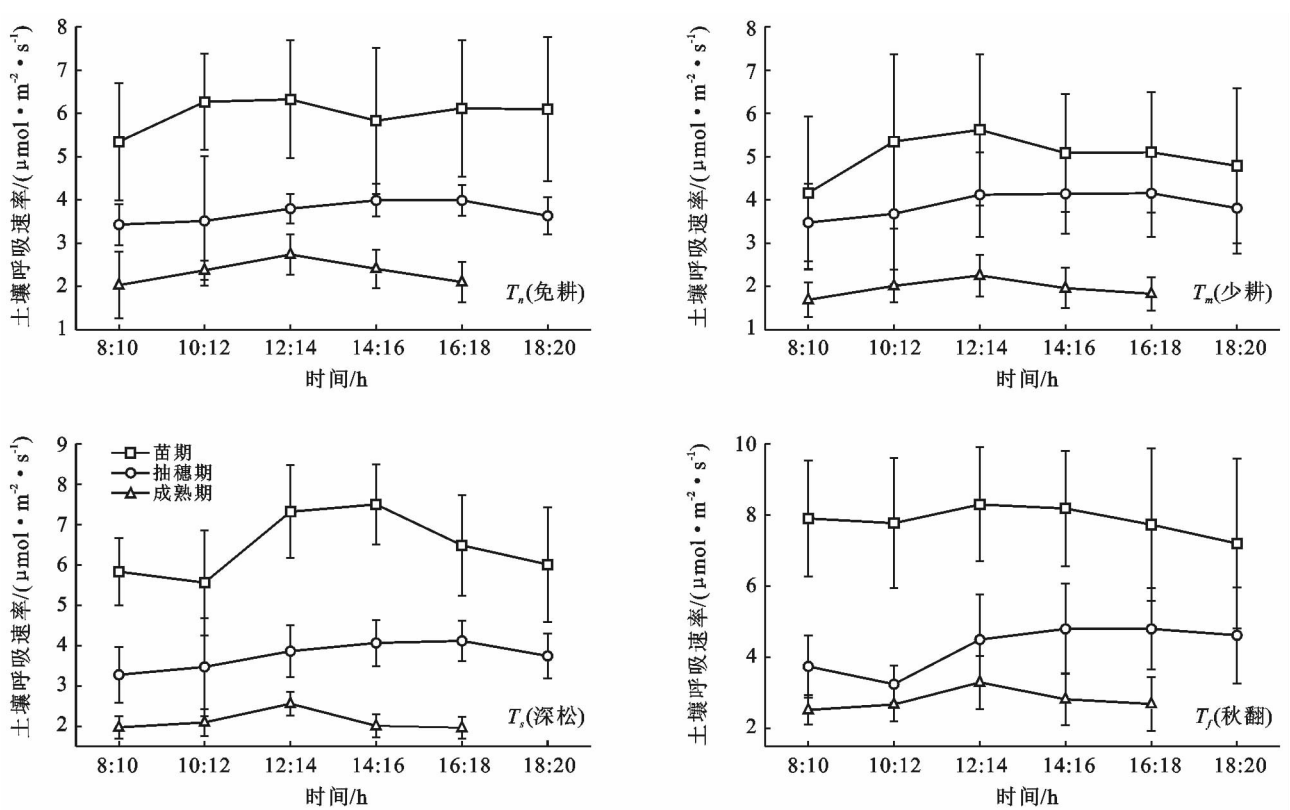
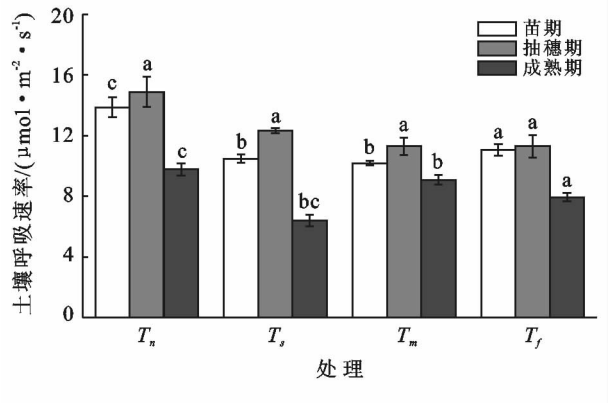



**图 1　不同处理土壤呼吸速率日变化**

该地区土壤呼吸随生育时期的不同产生明显变化(图 2)。苗期的土壤呼吸速率最高,其中不同处理间土壤呼吸速率依次为:$T_f>T_m>T_s>T_n$;随着玉米的生长,土壤呼吸也逐渐减小,在成熟期达到最低值。

整个生育期平均土壤呼吸变幅在 2.28～7.58 μmol/(m² · s)之间。处理间土壤呼吸总速率：$T_f > T_s > T_m > T_n$，苗期和成熟期 $T_f > T_n$，且两处理间差异显著，抽穗期差异不显著，$T_m$ 和 $T_s$ 在 3 个时期之间差异均不显著。




注：不同小写字母表示同一时期不同耕作方式间差异显著，$p<0.05$。下同。

**图 2 不同处理生育期土壤呼吸速率变化**

## 2.2 不同耕作方式对土壤有机碳的影响

土壤有机碳含量与土壤呼吸速率关系密切，在夏玉米生长发育的 3 个时期(图 3)，较 $T_f$ 处理，$T_n$ 处理能显著提高土壤的有机碳含量($p<0.01$)，平均增幅为 26.79%，这与土壤呼吸规律正好相反。$T_m$ 与 $T_s$ 处理在苗期和抽穗期差异不显著，在成熟期差异显著。4 种耕作方式下土壤有机碳含量均随生育期的变化呈先增后减的趋势，其中在抽穗期达到最大。

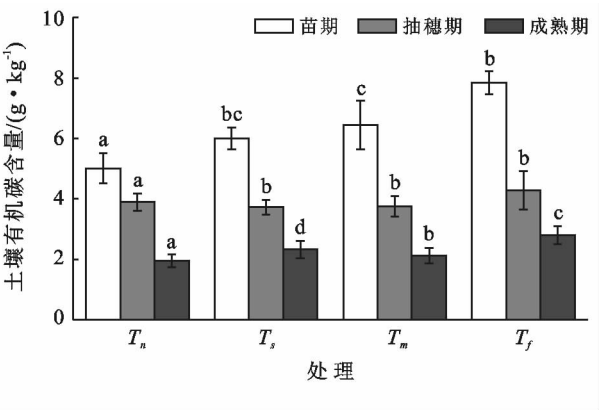



**图 3 不同处理生育期土壤有机碳含量变化**

## 2.3 不同耕作方式对土壤酶活性的影响

由表 1 可知，土壤过氧化氢酶活性、脲酶活性、蔗糖酶活性、β-葡萄糖苷酶活性在夏玉米生长发育的各个时期 $T_n$ 和 $T_f$ 有显著差异，蛋白酶活性在出苗期和抽穗期各处理间差异显著，而成熟期差异不显著。进一步统计分析发现，在整个生育期内，与 $T_f$ 相比，$T_n$ 处理的土壤蛋白酶活性、碱性磷酸酶活性、脲酶活性、蔗糖酶活性和 β-葡萄糖苷酶活性均有所增加，分别增加 38.02%，15.37%，37.71%，101.02% 和 17.58%；而土壤过氧化氢酶(CAT)活性增加不明显。

生育时期、耕作方式对土壤蛋白酶、碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶和 β-葡萄糖苷酶活性(耕作方式对过氧化氢酶活性效应不明显)的单独效应均达到 1%显著水平。但二者对 6 种土壤酶活性的影响效应不同，其中生育时期对脲酶活性的影响最大，而耕作方式以及两两交互作用均对蔗糖酶活性的影响最大(表 1)。

**表 1 不同耕作方式下玉米生育期耕层土壤酶活性**

| 生育期(A) | 处理(B) | 蛋白酶/(μg·g⁻¹·h⁻¹) | 过氧化氢酶/(mL·g⁻¹·h⁻¹) | 碱性磷酸酶/(mg·g⁻¹·d⁻¹) | 脲酶/(mg·g⁻¹·d⁻¹) | 蔗糖酶/(mg·g⁻¹·d⁻¹) | β—葡萄糖苷酶/(μg·g⁻¹·h⁻¹) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 苗 期 | $T_n$ | 44.34±1.59$^b$ | 1.05±0.12$^a$ | 22.72±1.56$^a$ | 3.2±0.10$^a$ | 22.40±1.57$^a$ | 53.93±1.37$^b$ |
| | $T_m$ | 62.06±3.37$^a$ | 1.23±0.11$^a$ | 19.69±0.87$^b$ | 2.59±0.01$^b$ | 15.10±0.85$^c$ | 63.80±0.71$^a$ |
| | $T_s$ | 32.53±1.78$^c$ | 1.14±0.11$^a$ | 17.08±0.67$^c$ | 2.37±0.08$^b$ | 20.85±0.24$^{ab}$ | 43.04±0.36$^d$ |
| | $T_f$ | 14.06±3.75$^d$ | 0.80±0.10$^b$ | 17.79±0.71$^{bc}$ | 1.92±0.23$^c$ | 19.07±0.62$^b$ | 47.64±2.13$^c$ |
| 抽穗期 | $T_n$ | 21.56±1.31$^c$ | 1.98±0.16$^a$ | 17.32±0.50$^a$ | 2.39±0.12$^a$ | 24.20±0.54$^a$ | 60.84±4.39$^a$ |
| | $T_m$ | 24.75±0.75$^b$ | 1.37±0.08$^b$ | 14.57±0.87$^b$ | 2.17±0.20$^a$ | 23.97±2.54$^a$ | 61.13±2.44$^a$ |
| | $T_s$ | 16.21±1.40$^d$ | 1.77±0.17$^a$ | 13.61±1.42$^b$ | 2.21±0.01$^a$ | 7.82±0.90$^b$ | 58.11±1.88$^a$ |
| | $T_f$ | 30.84±0.28$^a$ | 1.40±0.20$^b$ | 13.52±0.87$^b$ | 1.86±0.01$^b$ | 5.32±1.12$^b$ | 51.07±2.39$^b$ |
| 成熟期 | $T_n$ | 27.12±1.73$^a$ | 1.50±0.03$^c$ | 20.90±1.87$^b$ | 4.82±0.14$^a$ | 10.20±1.38$^{ab}$ | 36.95±0.60$^b$ |
| | $T_m$ | 22.50±3.18$^a$ | 2.04±0.25$^b$ | 24.63±1.26$^a$ | 4.15±0.09$^b$ | 11.27±0.72$^a$ | 48.27±1.77$^a$ |
| | $T_s$ | 24.31±9.32$^a$ | 1.78±0.09$^b$ | 21.25±1.08$^b$ | 3.46±0.08$^c$ | 8.20±1.41$^b$ | 45.10±1.66$^a$ |
| | $T_f$ | 22.50±0.18$^a$ | 2.51±0.05$^a$ | 20.09±1.73$^b$ | 3.78±0.33$^c$ | 3.85±0.99$^c$ | 30.32±4.11$^c$ |
| 生育时期(A) | | 74.8** | 131.35** | 104.30** | 519.36** | 246.91** | 179.51** |
| 处理(B) | | 32.60** | 0.33 | 16.29** | 67.54** | 111.14** | 61.26** |
| A×B | | 43.35** | 23.86** | 5.96** | 9.69** | 68.51** | 16.02** |

注：同列不同小写字母表示同一生育时期不同处理在 5%水平上差异显著；* $p<0.05$，** $p<0.01$。下同。

### 2.4　土壤呼吸速率与土壤酶活性及其土壤养分的相关性分析

对土壤呼吸与土壤肥力因子进行相关分析的结果显示(表 2),土壤养分之间的相关程度较高,各项指标之间均达到显著或极显著水平,可用来评价土壤肥力的高低。土壤各项酶活性之间的相关分析表明,脲酶与除蛋白酶外的其他酶之间均达到了显著水平,其中与过氧化氢酶、碱性磷酸酶、β-葡萄糖苷酶之间达到了极显著水平($p<0.01$)。土壤呼吸速率与除了碱性磷酸酶、全氮、速效钾与 pH 值外的其他土壤肥力指标之间有较好的相关性,其中和过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶之间达到了极显著水平($p<0.01$)。

**表 2　土壤呼吸速率与土壤酶活性及土壤养分的关系**

| 指 标 | 呼吸速率 | 蛋白酶 | 过氧化氢酶 | 碱性磷酸酶 | 脲酶 | 蔗糖酶 | β-葡萄糖苷酶 | 有机碳 | 全氮 | 速效钾 | pH 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 呼吸速率 | 1 | | | | | | | | | | |
| 蛋白酶 | 0.384* | 1 | | | | | | | | | |
| 过氧化氢酶 | −0.747** | −0.333* | 1 | | | | | | | | |
| 碱性磷酸酶 | −0.239 | 0.241 | 0.192 | 1 | | | | | | | |
| 脲 酶 | −0.650** | 0.001 | 0.432** | 0.755** | 1 | | | | | | |
| 蔗糖酶 | 0.439** | 0.166 | −0.508** | −0.049 | −0.359* | 1 | | | | | |
| β-葡萄糖苷酶 | 0.330* | 0.315 | −0.309 | −0.338* | −0.591** | 0.503** | 1 | | | | |
| 有机碳 | 0.398* | 0.313 | −0.297 | −0.233 | −0.472** | 0.536** | 0.596** | 1 | | | |
| 全 氮 | 0.316 | −0.114 | −0.205 | −0.294 | −0.394* | 0.358* | 0.405* | 0.518** | 1 | | |
| 速效钾 | 0.200 | 0.159 | −0.281 | −0.517** | −0.538** | 0.638** | 0.700** | 0.613** | 0.355* | 1 | |
| pH 值 | −0.271 | −0.205 | 0.310 | 0.485** | 0.494** | −0.507** | −0.562** | −0.606** | −0.402* | −0.728** | 1 |

## 3　结果与讨论

(1) 土壤碳库的动态平衡直接影响土壤肥力和作物产量的高低。本研究结果表明,免耕能显著增加土壤有机碳含量,这是因为一方面免耕表层中的残茬覆盖物经微生物转化进入土壤表层,从而增加土壤总有机碳的含量[14],另一方面免耕能够通过增加土壤团聚体的稳定性促进土壤有机碳的增加与积累[15-16]。

(2) 土壤酶在物质循环和能量流动中发挥着极其重要的作用[17-18]。结果表明,脲酶、蔗糖酶与土壤有机碳的关系最为密切($p<0.01$),免耕处理下土壤酶活性(除过氧化氢酶)要显著高于传统翻耕,说明在免耕土壤中有机物质的转化最为强烈,满足了微生物对养分的需求,增加了其转化的底物,大大促进了微生物的繁殖,从而保护了大量的微生物使其具有较高的酶活性[19-20];pH 值也在不同程度影响着酶活性,相关分析显示,pH 值与水解类酶有显著的相关性($p<0.01$),这与赵静等[21]在文登酸化梨园的研究结果类似。

(3) 不同处理下农田土壤呼吸速率的变化规律基本相同,但与传统耕作($T_f$)相比,免耕($T_n$)能够明显降低土壤呼吸速率,主要表现在玉米在出苗期和成熟期。这与 Gesch[22],Reicosky [23]等的研究相吻合,却与赵红香[24]、刘合明等[25]等研究不同,主要原因可能有 3 个方面:一是不同耕作方式由于对土壤的扰动不同,将影响土壤的结构和土壤孔隙状况,传统的耕作方式($I_f$)的土壤扰动程度远大于免耕 $T_n$,土壤的通透性强,从而使 $O_2$ 浓度增大,限制了 $CO_2$ 的释放,降低了呼吸作用[26];二是传统耕作打破了犁底层,更能促进作物根系生长,根生长呼吸以及根生长产生的分泌物加快了根际土壤微生物呼吸,而土壤呼吸以根系呼吸和微生物呼吸为主,进而表现为土壤呼吸速率的增加[27-28];三是土壤呼吸在受外界环境条件影响的同时也受土壤酶活性变化的影响,本试验研究测定的酶有脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、蛋白酶、过氧化氢酶和β-葡萄糖苷酶,与土壤呼吸速率的相关性表明,土壤呼吸与酶活性(除碱性磷酸酶)之间有较好的相关性。另外,生育时期对土壤呼吸速率的影响也不容忽视,本研究发现,玉米在苗期的呼吸速率高于抽穗期和成熟期,这可能一方面前期耕作和播种会导致土壤有机碳的大量损失、$CO_2$ 释放量增加[29-30],另一方面可能由于前期灌溉使土壤含水量增加,促进了根系的呼吸、微生物群落的活动加剧从而土壤呼吸增强[31]。

[ 参 考 文 献 ]

[1] Mark A. Maslin, Ellen Thomas. Balancing the deglacial global carbon budget: the hydrate factor[J]. Quaternary Science Reviews, 2003,22(15):1729-1736.

[2] 孟凡乔,关桂红,张庆忠,等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报,2006,26(6):992-999.

[3] 张东秋,石培礼,张宪洲.土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J].地球科学进展,2005,20(7):778-785.

[4] 李红生,刘广全,王鸿喆,等.黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子[J].生态学报,2008,28(9):4099-4106.

[5] 刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J].生态学报,1997,17(5):19-26.

[6] 郭明英,朝克图,尤金成,等.不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性[J].草地学报,2012,20(1):42-48.

[7] 曾艳,周柳强,黄美福,等.不同施氮量对桑园红壤耕层酶活性的影响[J].生态学报,2014,34(18):5306-5310.

[8] 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.

[9] 谷晓楠,贺红士,陶岩,等.长白山土壤微生物群落结构及酶活性随海拔的分布特征与影响因子[J].生态学报,2017,37(24):1-11.

[10] 杨帆,杨万勤,吴福忠,等.荼对川西亚高山森林土壤呼吸、可溶性有机碳和微生物生物量的影响[J].应用生态学报,2018,29(3):1-10.

[11] 关松荫.土壤酶及研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:60-126.

[14] 王晓凌,陈明灿,张雷.不同耕作方式对土壤微生物量和土壤酶活性的影响[J].安徽农学通报,2007,13(12):28-30.

[15] 周萍,宋国菡,潘根兴,等.南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究[J].土壤学报,2008,45(6):1063-1071.

[16] 唐小红,邵景安,黄雪夏,等.垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征[J].土壤学报,2007,44(2):235-243.

[17] 张丽莉,张玉兰,陈利军,等.稻-麦轮作系统土壤糖酶活性对开放式 $CO_2$ 浓度增高的响应[J].应用生态学报,2004,15(6):1019-1024.

[18] 张玉兰,张丽莉,陈利军,等.稻-麦轮作系统土壤水解酶及氧化还原酶活性对开放式空气 $CO_2$ 浓度增高的响应[J].应用生态学报,2004,15(6):1014-1018.

[19] 任万军,刘代银,吴锦秀.免耕高留茬抛秧对稻田土壤肥力和微生物群落的影响[J].应用生态学报,2009,20(4):817-822.

[20] 魏朝富,高明,车福才.垄作免耕下稻田土壤团聚体和水热状况变化的研究[J].土壤学报,1990,27(2):172-178.

[21] 赵静,韩甜甜,谢兴斌,等.酸化梨园土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系[J].水土保持学报,2011,25(4):115-120.

[22] Gesch R W, Reicosky D C, Gilbert R A, et al. Influence of tillage and plant residue management on respiration of a Florida Everglades Histosol[J]. Soil & Tillage Research, 2007,92(1):156-166.

[23] Reicosky D C, Dugas W A, Torbert H A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems[J]. Soil & Tillage Research, 1997,41(1/2):105-118.

[24] 赵红香.秸秆还田与耕作方式对麦—玉两熟农田土壤质量和生产力的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2013.

[25] 刘合明.夏玉米—冬小麦轮作土壤 $CO_2$ 释放效应及其机理研究[D].石家庄:河北农业大学,2009.

[26] Pangle R E, Seiler J. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil $CO_2$ efflux rates in a 2-years-old loblolly pine plantation on the Virginia Piedmont [J]. Environment Pollution, 2002,116(3):S85-S96.

[27] 徐文彬,刘伟屏,刘广深.应用 DNDC 模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤 $N_2O$ 释放的潜在影响[J].应用生态学报,2001,12(6):917-922.

[28] 骆亦其,周旭辉.土壤呼吸与环境[M].姜丽芬,曲来叶,周玉梅,等译.北京:高等教育出版社,2007.

[29] 孙小花,张仁陟,蔡立群,等.不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响[J].应用生态学报,2009,20(9):2173-2180.

[30] 于爱忠,黄高宝,柴强.不同耕作措施对西北绿洲灌区冬小麦农田土壤呼吸的影响[J].草业学报,2012,21(1):273-278.

[31] 杨士红,王乙江,徐俊增,等.节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J].农业工程学报,2015,31(8):140-146.