

不同前茬与施氮量对半干旱黄土高原夏玉米产量和土壤有机碳库的影响

孙小花¹, 牛俊义², 赵刚³

(1. 甘肃省农业科学院马铃薯研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 研究了不同前茬(冬油菜茬、冬小麦茬)与不同施氮量(N_0 , $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; N_{120} , $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; N_{240} , $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)对半干旱黄土高原夏玉米产量和土壤有机碳库的影响。结果表明: 施氮显著增加了夏玉米产量, 与不施氮比较, 冬油菜茬和冬小麦茬分别增产 9.76%~24.88% 和 12.56%~22.50%, 且冬油菜茬的产量高于冬小麦茬 6.40%~11.05%。同一茬口不同处理间夏玉米田土壤总有机碳(TOC)含量为 $N_{240} > N_{120} > N_0$, N_0 、 N_{120} 和 N_{240} 处理下冬油菜茬土壤 TOC 含量分别高于冬小麦茬 $1.07\sim1.70$ 、 $1.07\sim1.93\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.77\sim1.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。两种前茬下, 夏玉米出苗至成熟土壤易氧化有机碳(EOOC)和颗粒有机碳(POC)含量均随着施氮量的增加而增加, 冬油菜茬土壤 EOOC 和 POC 含量分别高于冬小麦茬 $0.09\sim4.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.05\sim0.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施氮对土壤 EOOC 和 POC 的贡献率分别为 0.34%~3.45% 和 10.14%~51.41%。综上分析, 施氮有利于增加半干旱黄土高原夏玉米产量, 并能促进土壤有机碳库的积累。在本试验区同等肥力土壤条件下, 复播夏玉米以冬油菜茬为优, 且施氮量以 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为宜。

关键词: 冬油菜茬; 冬小麦茬; 施氮; 夏玉米; 产量; 总有机碳; 易氧化有机碳; 颗粒有机碳

中图分类号: S153.6; S513 **文献标志码:** A

Effects of previous crop stubbles and nitrogen applied amount on summer maize yield and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China

SUN Xiao-hua¹, NIU Jun-yi², ZHAO Gang³

(1. Potato Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Dryland Agricultural Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to identify the effects of different previous crop stubbles and nitrogen applied amount on summer maize yield and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China, a field experiment was conducted with three nitrogen fertilizer application rates: $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_0), $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_{120}), $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_{240}) under previous winter rape and winter wheat crops stubbles respectively at Zhenyuan, Gansu province, China. The results showed that, the summer maize yield was increased by 9.76%~24.88% and 12.56%~22.50% under previous winter rape and winter wheat crops stubbles compared with no control N_0 (CK) respectively. Especially, the yield of summer maize in condition of previous winter rape crop was 6.40%~11.05% higher than that under winter wheat crop. Under different nitrogen supply levels within each of crop stubbles, the orders of successively decreasing in content of total soil organic carbon (TOC) was $N_{240} > N_{120} > N_0$, and the content of total soil organic carbon under winter rape crop was $1.07\sim1.70$, $1.07\sim1.93\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.77\sim1.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ higher than that under winter wheat crop. The contents of easily oxidized organic carbon (EOOC) and particulate organic carbon (POC) increased with the nitrogen amount under both previous winter rape and winter wheat crops. However, the contents of EOOC and POC under winter rape crop was $0.09\sim4.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.05\sim0.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ higher than that under winter wheat crop respectively. The contribution of nitrogen application to contents of EOOC and POC was 0.34%~3.45% and 10.14%~51.41% respectively. Therefore, manure

application with nitrogen fertilizers to soil was both beneficial to yield of summer maize increase and organic carbon pools upgrade in soil at a semiarid loess site of China. And multiple cropping summer maize should be adopted in the field with winter rape stubble; the optimal nitrogen fertilizer fertilization for summer maize was $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ nitrogen (N_{240}) for the experimental area.

Keywords: winter rape/wheat rotation; nitrogen application; summer maize; yield; soil organic carbon

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)作为土壤结构保持、养分循环供应及土壤微环境的核心物质对作物生长发育具有重要意义^[1-2],也是反映土壤质量或土壤健康的一个重要指标^[3]。土壤有机碳库的动态平衡直接影响土壤肥力的保持与提高,进而影响作物产量水平^[4]。而土壤有机碳库的变化是一个漫长的过程,因此,越来越多的关注转向能够响应短期农作措施影响的活性有机碳(labile organic carbon, LOC)组分^[1,5-6],因其具有移动快、稳定性差、易氧化、矿化的特性,在指示土壤碳库变化上比总有机碳更灵敏,可作为快速判断碳库变化及改善土壤质量的有效手段^[7]。国内外的研究者多倾向于用易氧化有机碳(easily oxidized organic carbon, EEOC)和颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)作为表征土壤碳库周转和变化的指示物^[6,8]。它们作为土壤有机碳库的重要组成部分,可以在土壤全碳发生变化之前反映土壤的微小变化,并且直接参与土壤生物化学转化过程,作为土壤微生物生命活动的能源,对土壤养分的有效化具有重要作用,能更好地反映土壤质量变化、营养元素循环和转化速率等^[9-10]。近年来,对于土壤易氧化有机碳和颗粒有机碳的变化国内外已有部分研究。刘正刚等^[11]研究表明土壤易氧化有机碳与总有机碳含量显著正相关,随土层深度的加深而递减,且土地利用变化对土壤易氧化有机碳并没有显著影响。Majumder 等通过研究不同施肥处理对土壤有机碳库的影响,认为土壤易氧化有机碳的测定成本低廉,容易实现,可以作为评价土壤质量和作物产量的良好指标^[12-13]。土壤颗粒有机碳也可用作评价土壤质量变化和固碳能力的有效指标,其对管理措施的响应很敏感^[14],可作为土壤活性有机碳的组分和量度指标^[15],也可作为有机碳长期变化的累积性指标^[16]。因此,了解土壤有机碳库数量、质量及其变化特征对认知农田生态效应、机制及其效果评价具有重要意义。

同时,合理的施肥对于农业生产意义重大,Anonym 指出,如果不重视过量施肥带来的环境威胁,将造成灾难性的后果^[17]。氮肥对夏玉米等大秋作物而言,合理的施用量尤为重要。金继运等^[18]研究结果表明,高淀粉玉米和普通玉米在施氮量 195

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时可获得最高产量;赵营等^[19]综合考虑产量、氮肥利用率、养分运转及环境污染等因素,推荐陕西省扶风县最优施氮量为 $125\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;王俊忠等^[20]在河南省温县研究认为,夏玉米高产田推荐施氮量应控制在 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内;王宜伦等^[21]认为,河南省夏玉米超高产田的适宜施氮量为 $255\sim 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。由此可见,氮肥合理施肥量具有区域特点,与当地土壤、气候、栽培等因素有关。本研究以黄土高原半干旱偏润区不同前茬复播夏玉米及农田土壤为对象,通过田间试验,分析不同前茬与施氮量对夏玉米产量、土壤有机碳库的影响,探讨不同前茬下施氮对农田土壤总有机碳及活性有机碳(易氧化有机碳和颗粒有机碳)的影响,旨在为建立合理的施肥制度,提高农田土壤肥力与实现资源的可持续利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在甘肃省镇原县上肖乡甘肃省农业科学院镇原旱地农业试验站($35^{\circ}30'\text{N}$, $107^{\circ}29'\text{E}$)进行,海拔 $1\,254\text{ m}$,无霜期 165 d ,年平均温度 8.3°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 $2\,722^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量 500 mm 。降雨季节短而集中,主要分布在 $7\sim 9$ 月,占全年降水量的 $50\%\sim 70\%$ 。试验地土壤容重 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,肥力中等,田间最大持水量 21.8% 。供试夏玉米品种选择当地复播主栽品种金顿 302。供试田土壤基本理化性状见表 1。

1.2 试验设计

分别布设以冬油菜(试验 I)和冬小麦(试验 II)为前茬,进行夏玉米不同氮肥处理试验。

田间试验为单因素随机区组排列,在冬油菜茬/冬小麦茬口下,P、K 肥固定,设置 3 个 N 肥处理:(1)不施氮(N_0 (CK):纯 N $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$);(2) N_{120} :纯 N $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;(3) N_{240} :纯 N $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。每个处理 3 次重复,随机排列。带幅 100 cm ,膜面 70 cm ,膜间 30 cm ,膜上种植 2 行,行距 50 cm ,株距 33.3 cm ,每公顷留苗 $60\,000$ 株。每小区长 5 m ,宽 3 m 。各小区间、区组间均留 0.5 m 走道。试验地周边设 2 m 保护行。冬油菜茬 2013 年 6 月 10 日播种,同年 9 月

15 日收获,生育期 97 d;冬小麦茬 2013 年 6 月 19 日播种,同年 9 月 27 日收获,生育期 100 d。地膜覆盖处理为全膜覆盖,膜宽 120 cm、膜厚 0.008 mm (聚乙烯材料,甘肃天水天宝塑业有限责任公司)。施过磷

酸钙 375 kg·hm⁻²(含 P₂O₅ 12%)、硫酸钾 225 kg·hm⁻²(含 K₂O 50%)。所有肥料在播种时一次施入,不再追肥。

表 1 供试田土壤基本理化性状
Table 1 Basic physical-chemical properties of experiment field

土壤类型 Soil type	前茬 Fore-rotation	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	pH
覆盖黑垆土 Mulching black loessal soil	冬油菜 Winter rape	11.41	0.95	89.07	12.76	233.09	7.41
	冬小麦 Winter wheat	10.38	0.99	85.65	13.11	186.37	7.39

1.3 土壤样品采集与处理

1.3.1 冬油菜茬 分别于出苗(6 月 17 日)、拔节期(7 月 1 日)、抽雄期(7 月 28 日)、开花期(8 月 5 日)、吐丝期(8 月 15 日)、成熟期(9 月 15 日) 进行土壤样品采集。

1.3.2 冬小麦茬 分别于出苗(6 月 27 日)、拔节期(7 月 15 日)、抽雄期(8 月 11 日)、开花期(8 月 18 日)、吐丝期(8 月 28 日)、成熟期(9 月 27 日) 进行土壤样品采集。

田间采样时,土壤湿度适宜,按蛇形采样法每小区随机采集 3 点,采样深度 30 cm。土样放于塑料自封袋中带回,除去动植物残体、沙砾,同一小区的样品混匀作为一个土壤样品。室内自然风干,分别过 0.15 mm、0.25 mm、2 mm 筛备用。

1.4 分析方法

1.4.1 土壤总有机碳测定 采用外加热重铬酸钾-硫酸氧化-滴定法测定^[22]。称取过 0.15 mm 筛孔的风干土样 0.500 g,加入 5 mL 0.80 mol·L⁻¹ K₂Cr₂O₇ 标准溶液,再加入 5 mL 浓 H₂SO₄。将试管放于 170℃~180℃的油浴锅中加热 5 min,后将试管中溶液倒入 250 mL 三角瓶中,定容至 100 mL。加入邻菲罗啉指示剂 3 滴。用标准的 0.2 mol·L⁻¹FeSO₄ 滴定。记下 FeSO₄ 滴定体积(V),计算土壤总有机碳含量。

1.4.2 易氧化活性有机碳测定 采用高锰酸钾氧化法测定^[23]。土壤样品经研磨过 0.25 mm 筛孔,根据土壤总有机碳含量,计算含有 15 mg 碳的土壤样品量作为待测样品的称样重,然后将样品转移至 50 mL 离心管中,向离心管中加入 25 mL 浓度为 333 mmol·L⁻¹的高锰酸钾溶液,振荡 1 h,然后在转速 2 000 rpm 下离心 5 min,将上清液用去离子水以 1:250 倍稀释,吸取 1 mL 上清液转移至 250 mL 容量瓶中,加去离子水至 250 mL,稀释样品用分光光度

计在 565 nm 处测定吸光值,配制高锰酸钾标准曲线。易氧化活性有机碳计算公式为:

易氧化有机碳/mg·kg⁻¹ =
$$\frac{\text{KMnO}_4 \text{ 浓度变化值} \times 25 \times 250 \times 9}{\text{土样重} \times 1000}$$

1.4.3 颗粒有机碳测定^[24-25] 根据 Cambardella 等的方法,并作了一些改进。具体方法为:称取过 2 mm 筛孔的风干土 20.00 g,加入 100 mL 5 g·L⁻¹的 (NaPO₃)₆ 水溶液,手摇 15 min,再震荡(90 r·min⁻¹) 18 h。把土壤悬液过 53 μm 筛,反复用蒸馏水冲洗,把所有留在筛子上的物质,在 60℃下过夜烘干称量,计算这些部分占整个土壤样品质量的比例为颗粒有机碳所占比例。通过分析烘干样品中有机碳含量,换算为单位质量土壤样品的对应组分有机碳含量即为土壤的颗粒有机碳含量。

夏玉米产量的测定:于每个试验小区随机选取两行夏玉米,测定夏玉米籽粒的鲜重及含水量(105℃烘 1 h,杀青,70℃下烘 72 h),最后折算到每公顷的产量。

1.5 数据处理

试验数据用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析,不同处理差异显著性的多重比较采用最小显著差异(LSD_{0.05})法。各图表中的数据均为 3 次重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同前茬与施氮量对夏玉米产量的影响

如表 2 所示,冬油菜茬与冬小麦茬 N₁₂₀和 N₂₄₀处理中的夏玉米产量均显著高于 CK(N₀)(P<0.05),而冬油菜茬 N₁₂₀处理与 CK 差异不显著(P>0.05)。冬油菜茬 N₁₂₀和 N₂₄₀处理较 CK 分别增产 9.76%和 24.88%,冬小麦茬 N₁₂₀和 N₂₄₀处理较 CK 分别增产 12.56%和 22.50%。冬小麦茬 N₁₂₀处理中的夏玉米

产量显著高于 N_0 处理(平均高 $529.15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),而冬油菜茬差异不显著。总的来看,冬油菜茬的夏玉米产量均高于相同处理下的冬小麦茬的产量,这可能与冬小麦茬夏玉米播种较迟,前期营养生长过快,

后期生殖生长不足,导致夏玉米减产有关。从产量构成看,不论是冬油菜茬还是冬小麦茬,施氮均显著增加了穗粒数和千粒重($P < 0.05$),且随施氮量的增加而增加。

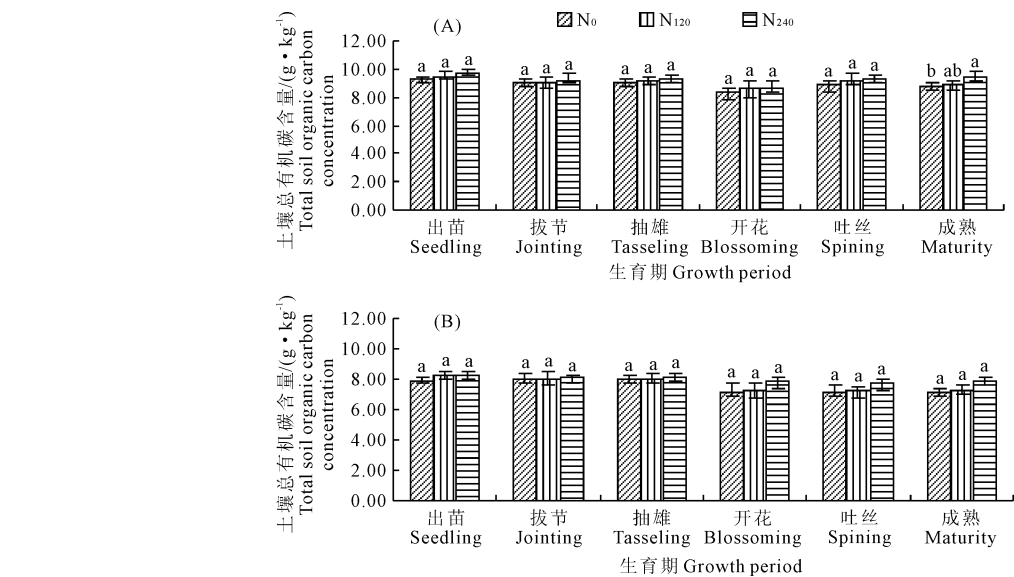
表 2 不同前茬与施氮量对夏玉米籽粒产量及其构成因素的影响					
Table 2 Effects of fore-rotation and N-fertilizer application on yield and its components in summer maize					
前茬作物 Fore-rotation	处理 Treatment	产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield	穗数/(万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$) Ear number/($10^4\text{ plant}\cdot\text{hm}^{-2}$)	穗粒数/粒 Grains per ear	千粒重/g 1000-grain weight
冬油菜 Winter rape	N_0	5849.59 b	6.00 a	511.66 c	311.82 b
	N_{120}	6434.33 ab	6.00 a	524.39 b	313.63 b
	N_{240}	7303.65 a	6.00 a	531.53 a	318.02 a
冬小麦 Winter wheat	N_0	5393.81 b	6.00 a	509.24 c	309.67 b
	N_{120}	6047.47 a	6.00 a	521.27 b	313.30 ab
	N_{240}	6576.62 a	6.00 a	529.59 a	317.46 a

注:同一茬口的同列数据后标以不同字母者表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。
Note: data in the same column with different letters indicate significant difference at 0.05 level.

2.2 不同前茬与施氮量对土壤有机碳库的影响

2.2.1 对土壤总有机碳(TOC)的影响 不同前茬与施氮量处理中夏玉米各生育期 0~30 cm 土层土壤总有机碳含量见图 1。由图 1 可知,不论是冬油菜茬还是冬小麦茬施氮均增加了土壤总有机碳的含

量,但差异不显著。与 $CK(N_0)$ 相比,冬油菜茬 N_{120} 与 N_{240} 处理土壤 TOC 分别高出 $0.04\sim 0.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $0.18\sim 0.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;冬小麦茬 N_{120} 与 N_{240} 处理土壤 TOC 分别高出 $0.07\sim 0.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $0.13\sim 0.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。



注:(A)为冬油菜茬;(B)为冬小麦茬;下同。
Note: (A) – winter rape crops rotation; (B) – winter wheat crops rotation; the same as below.

图 1 不同前茬与施氮量下夏玉米各生育期 0~30 cm 土层土壤总有机碳含量

Fig.1 Total soil organic carbon in the 0~30 cm soil layer under different fore-rotation and N-fertilizer application

同一茬口不同处理间夏玉米田土壤 TOC 含量为 $N_{240} > N_{120} > N_0$,但处理间差异不显著($P > 0.05$),表明氮肥的施用能够促进土壤有机碳的积累。不同施氮处理间比较均表现为 N_{240} 处理含量大于 N_{120} 处理,说明高氮有利于土壤有机碳的积累。夏玉米各生育期土壤 TOC 含量变化除冬油菜茬成熟期 N_{240} 与 N_0 差异显著外($P < 0.05$),其余时期差异均不显著($P > 0.05$)。

不同茬口间 TOC 含量有着相同的变化趋势,但冬油菜茬的 TOC 含量高于冬小麦茬,其中 N_0 、 N_{120} 和

N₂₄₀处理冬油菜茬土壤 TOC 含量分别高于冬小麦茬 1.07 ~ 1.70、1.07 ~ 1.93 g·kg⁻¹和 0.77 ~ 1.60 g·kg⁻¹。这可能一方面是由于冬油菜属于直根系作物,其根系生长较深,可达土层深度 20 ~ 40 cm,从而导致 20 cm 以下土层有机碳含量较高;另一方面是由于冬油菜茬夏玉米较冬小麦茬提前播种 10 d 左右,作物残茬的累积、分解对土壤有机碳养分增加的作用时间较长。

2.2.2 对土壤易氧化有机碳(EOOC)含量的影响
用化学氧化方法测定的易氧化有机碳是土壤中有效性较高、移动较快、易氧化、易被土壤微生物分解利用、能直接供给作物养分的有机碳,可用于指示土壤有机碳在短期内的变化特征,是反映土壤有机碳有效性和土壤质量的重要指标。不同前茬与施氮量处理下土壤易氧化有机碳含量的变化如图 2、图 3 所示。由图 2、图 3 可知:不同前茬与施氮量处理下土壤 EOOC 含量随着夏玉米生长进程发生变化,两种不同前茬下,从出苗至成熟期土壤 EOOC 含量随着

施氮量的增加而增加。冬油菜茬土壤 EOOC 含量在开花至成熟期处理间差异较大,N₂₄₀处理显著高于 N₀ 和 N₁₂₀处理($P < 0.05$),N₀ 和 N₁₂₀处理差异不显著($P > 0.05$);冬小麦茬土壤 EOOC 含量在抽雄至成熟期处理间有差异,N₂₄₀处理显著高于 N₀ 处理($P < 0.05$),N₀ 和 N₁₂₀处理差异不显著($P > 0.05$)。由图 3 可知,冬油菜茬中在夏玉米整个生育期内,土壤 EOOC 含量从出苗开始缓慢降低,到开花期达到最低,之后逐渐增大,各施氮处理变化趋势一致;冬小麦茬土壤 EOOC 含量从出苗开始缓慢降低,到抽雄期达到最低,之后逐渐增大,其中 N₂₄₀处理整个生育期变化较 N₀ 和 N₁₂₀处理平稳。表明氮肥的施用能够促进土壤易氧化有机碳的积累,且随施氮量的增大而增大。夏玉米出苗时期土壤 EOOC 含量较高,开花前后降到最低值,之后又逐渐增大,这可能与夏玉米田苗期土壤温度高,微生物活动频繁,此期田间管理措施较多等有关。

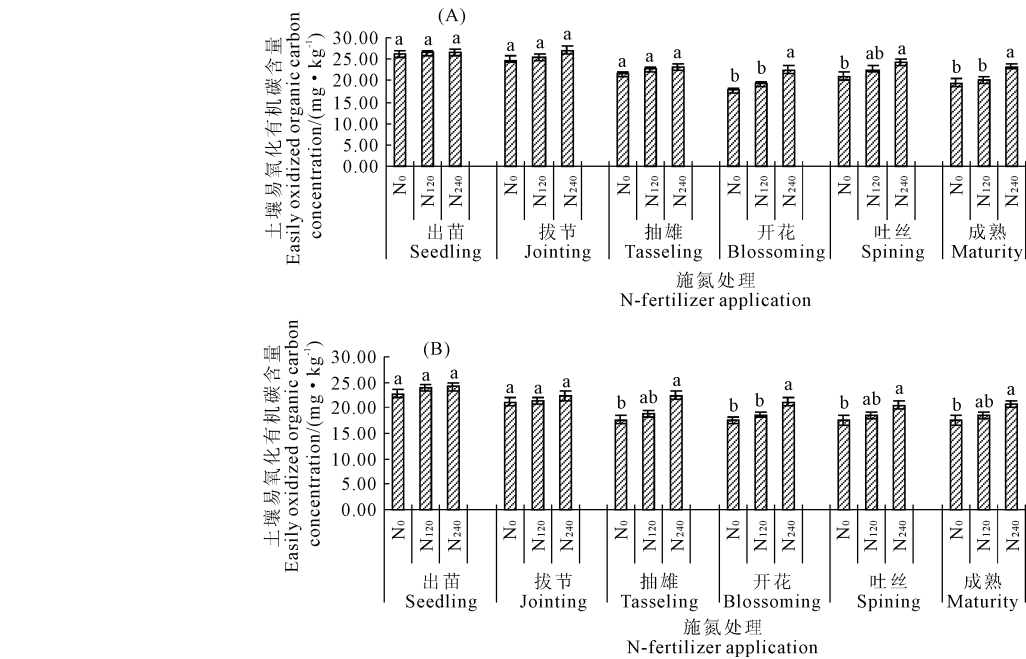


图 2 不同前茬与施氮量下夏玉米各生育期 0 ~ 30 cm 土层土壤易氧化有机碳含量

Fig.2 Easily oxidized soil organic carbon in the 0 ~ 30 cm soil layer under different fore-rotation and N-fertilizer application

2.2.3 对土壤颗粒有机碳(POC)含量的影响
土壤颗粒有机碳(POC)是与土壤砂粒组分结合的那部分有机碳,通常由未分解或半分解的动植物和根系残体组成,在土壤中周转速度较快,对表层土壤中植物残体的积累和根系分布的变化非常敏感,最易受土壤管理方式的影响,被作为土壤有机碳库变化的早期预示指标,是活性较高的有机碳库,在土壤碳、氮循环中有着重要的作用。由图 4、图 5 可知,不同

前茬土壤 POC 含量变化趋势迥异,冬油菜茬在拔节期和成熟期、冬小麦茬在开花后 N₀ 和 N₂₄₀处理差异显著($P < 0.05$),但 N₀ 和 N₁₂₀、N₁₂₀ 和 N₂₄₀处理间差异不显著($P > 0.05$),两种前茬下其他生育期各处理间差异均不显著;不同茬口间比较,从夏玉米出苗到成熟,冬油菜茬土壤 POC 含量高于冬小麦茬 0.05 ~ 0.27 g·kg⁻¹。这可能是由于冬油菜茬夏玉米播种较冬小麦茬早,作物根系残茬、有机物料分解较多有关。

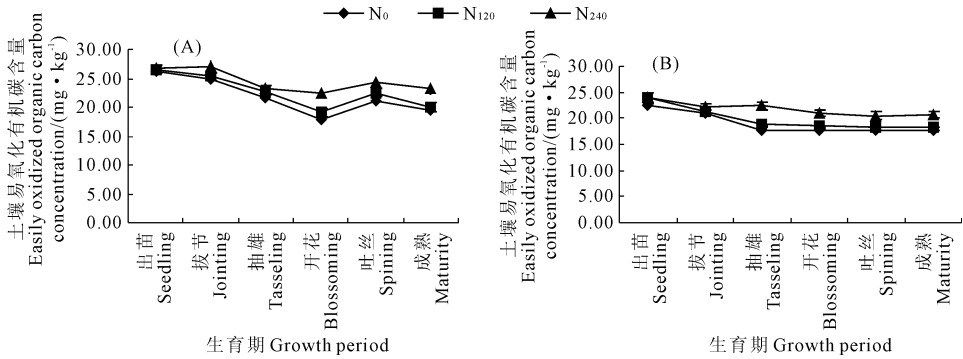


图 3 不同前茬与施氮量下夏玉米各生育期 0~30 cm 土层土壤易氧化有机碳动态变化

Fig.3 Dynamic changes of easily oxidized soil organic carbon in the 0~30cm soil layer under different fore-rotation and N-fertilizer application

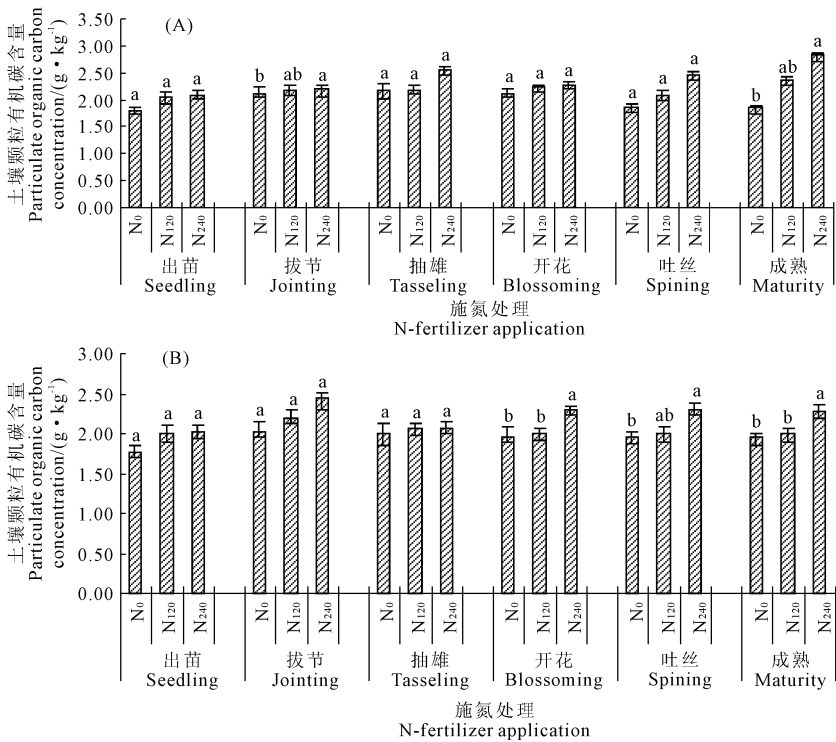


图 4 不同前茬与施氮量下夏玉米各生育期 0~30 cm 土层土壤颗粒有机碳含量

Fig.4 Particulate organic carbon in the 0~30 cm soil layer under different fore-rotation and N-fertilizer application

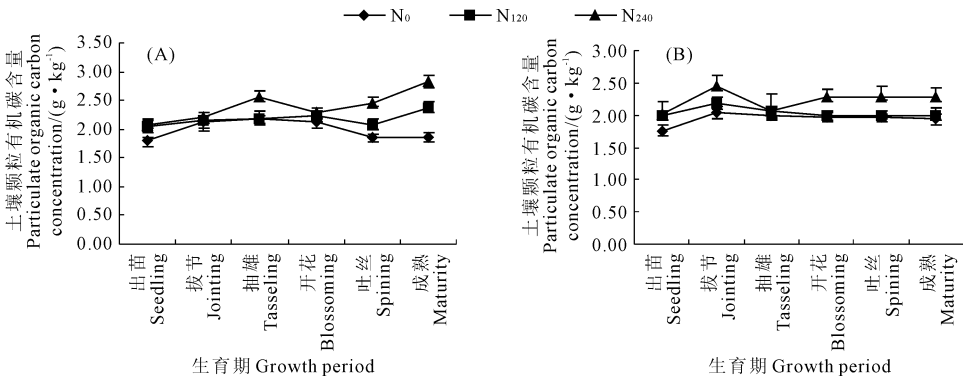


图 5 不同前茬与施氮量下夏玉米各生育期 0~30 cm 土层土壤颗粒有机碳动态变化

Fig.5 Dynamic changes of particulate organic carbon in the 0~30 cm soil layer under different fore-rotation and N-fertilizer application

2.3 不同前茬与施氮量对土壤有机碳组分的贡献

采用下式计算不同施氮量处理下土壤中增加的总有机碳进入不同有机碳组分的比例:

$$\text{施氮对有机碳的贡献率}(\%) = \frac{N_{oc} - CK_{oc}}{N_{toc} - CK_{toc}} \times 100\%$$

式中, N_{oc} 为施氮处理土壤中某组分有机碳含量; CK_{oc} 为对照处理土壤中某组分有机碳含量; N_{toc} 为施氮处理土壤总有机碳含量; CK_{toc} 为对照处理土壤总有机碳含量。

与土壤总有机碳含量相比,各组分有机碳对总有机碳的贡献率可以指示土壤有机碳活性强度,能更好反映出不同施肥措施对土壤碳转化的影响。分

析结果表明(表 3), N_{120} 、 N_{240} 两种不同施氮处理均有利于土壤有机碳的转化。冬油菜茬中, N_{120} 、 N_{240} 处理对 EOC 的贡献率分别为 0.34% ~ 0.92%、0.43% ~ 2.63%,对 POC 的贡献率分别为 10.14% ~ 36.25%、13.29% ~ 51.41%;冬小麦茬, N_{120} 、 N_{240} 处理对 EOC 的贡献率分别为 0.48% ~ 3.45%、0.54% ~ 1.83%,对 POC 的贡献率分别为 10.51% ~ 17.84%、12.57% ~ 23.40%。这两种施肥模式对 EOC 的贡献较小,仅为 0.34% ~ 3.45%,对 POC 的贡献为 10.14% ~ 51.41%,这一结果表明施氮有利于增加黄土高原半干旱偏润区农田土壤中 POC 的比例。

表 3 施氮对不同组分有机碳的贡献率/%					
Table 3 Contribution rate of increased soil organic carbon within different organic carbon fractions under different N-fertilizer application					
前茬作物 Fore-rotation	生育期 Growth periods	施氮对易氧化有机碳的贡献率 Contribution rate of EOC under different N-fertilizer application		施氮对颗粒有机碳的贡献率 Contribution rate of POC under different N-fertilizer application	
		N_{120}	N_{240}	N_{120}	N_{240}
冬油菜 Winter rape	出苗 Seedling	0.58	0.49	14.20	16.29
	拔节 Jointing	0.82	2.63	13.04	13.29
	抽雄 Tasseling	0.92	1.87	10.14	17.01
	开花 Blossoming	0.34	1.10	15.99	16.63
	吐丝 Spining	0.43	0.43	28.89	30.40
	成熟 Maturity	0.54	0.88	36.25	51.41
冬小麦 Winter wheat	出苗 Seedling	1.08	0.97	14.66	18.05
	拔节 Jointing	0.90	0.78	10.51	23.40
	抽雄 Tasseling	3.45	1.83	17.84	14.53
	开花 Blossoming	0.91	0.63	11.45	12.57
	吐丝 Spining	0.65	0.68	11.69	13.02
	成熟 Maturity	0.48	0.54	11.95	12.86

3 讨 论

3.1 不同前茬与施氮量对夏玉米产量的影响

在农田生产条件下,作物生长发育受水、肥、气、热及栽培管理措施等因素的影响,在栽培管理措施相对一致的情况下,肥料投入对于作物增产起着不可替代的基础性作用^[26-27]。本试验结果表明, N_{120} 和 N_{240} 处理显著增加了夏玉米产量,而 N_0 处理对夏玉米产量没有影响,两者间的关系呈直线型。与高肖贤等^[28]研究的抛物线型不一致,可能因为其氮肥施用量范围(0 ~ 451、0 ~ 331 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)偏高。 N_0 处理的增产效果不显著,这可能与试验时间较短,前茬作物残茬、秸秆、根系等的腐解率较低有关。 N_{120} 处理的产量高于 N_{240} 处理,这可能是高氮处理促进了

前茬根系的分解与加快后茬作物生物量的积累的交互作用导致的,总之,施氮处理促进了土壤中有效养分的释放以供夏玉米生长需要。本研究结果表明,在黄土高原半干旱偏润区中等肥力土壤上施氮量为 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时可获得最高产量。

3.2 不同前茬与施氮量对土壤总有机碳(TOC)的影响

土壤 TOC 含量是土壤、气候、植被覆盖和人为干扰等多重因素的综合作用下有机碳输入与输出的动态平衡的结果。土壤 TOC 主要来源于动植物、微生物残体、根系分泌物等^[29]。土壤 TOC 含量直接影响土壤肥力水平和作物产量的高低^[1],因此增加农田土壤碳库储量,对提高土壤生产力具有重要意义。而施化肥通过增加作物生物量而引起土壤 TOC

含量增加^[30],一方面由于它们可以增加作物产量,从而使更多作物残茬还田;另一方面因肥料本身含有碳,可向土壤直接输入有机碳。本试验结果表明不论是冬油菜茬还是冬小麦茬施氮均显著增加了土壤 TOC 的含量,以 N_{240} 处理增幅最高。同一茬口不同处理间夏玉米田土壤 TOC 含量为 $N_{240} > N_{120} > N_0$,但处理间差异不显著 ($P > 0.05$),表明氮肥的施用能够促进 TOC 的积累,不施氮对土壤 TOC 的累积作用不明显,这可能与本文试验时间较短有关。

3.3 不同前茬与施氮量对土壤易氧化有机碳 (EOOC) 的影响

土壤 EOOC 可表征土壤物质循环特征,作为土壤潜在生产力和土壤管理措施变化引起土壤有机质变化的早期指标^[31]。EOOC 在指示土壤质量和肥力变化时比 TOC 更灵敏,可及时反映土壤肥力和物理性质的变化;而难分解或稳定的土壤有机碳可能更适合于反映土壤固碳特征的主要部分。本试验表明,不同前茬与施氮量处理下土壤 EOOC 含量随着夏玉米生长进程的推进发生变化,两种不同前茬下,从出苗至成熟期土壤 EOOC 含量随着施氮量的增加而增加。夏玉米出苗期土壤 EOOC 含量较高,开花前后降到最低值,之后又逐渐增大,这可能与夏玉米苗期土壤温度高,微生物活动频繁,此期间管理措施较多等有关,作物残茬和化肥活性组分进入土壤后易被分解利用,使得土壤中 EOOC 含量上升。

3.4 不同前茬与施氮量对土壤颗粒有机碳 (POC) 的影响

颗粒有机碳 (POC) 是土壤中相对活跃的有机碳库^[32],是土壤有机质中的非保护性组分,其性质不稳定,易被微生物利用、分解,其主要来自于植物残渣,对施肥比较敏感^[33]。本研究结果表明,不同前茬土壤 POC 含量变化不同,冬油菜茬在拔节期和成熟期、冬小麦茬在开花后 N_0 和 N_{240} 处理差异显著 ($P < 0.05$),但 N_0 和 N_{120} 、 N_{120} 和 N_{240} 处理间差异不显著 ($P > 0.05$),两种前茬下其他生育期各处理间差异不显著; N_{120} 、 N_{240} 处理较 N_0 处理土壤 POC 含量明显增大,这与 Ouédraogo^[34] 等研究结果不一致, Ouédraogo 等研究认为,有机肥能增加土壤 POC 含量,但单施氮肥不利于有机质的积累,会引起 POC 含量降低。这可能是由于研究区域土壤、气候、植被覆盖和人为干扰等不同所致。

3.5 不同前茬与施氮量对土壤有机碳组分的贡献

土壤 EOOC 和 POC 分配比例综合了土壤有机碳

绝对含量与其组分有机碳含量,排除了有机碳总量的差异,该指标可以表明不同土地管理方式下土壤有机碳的稳定强度。袁颖红等^[35]的研究结果表明,有机肥及有机肥与化肥配施有利于提高土壤 POC 分配比例,而本研究表明,施氮也有利于提高黄土高原半干旱偏润区农田土壤中 POC 对总有机碳的贡献率。POC 的分配比例一般在 10% 以上^[36],可高达 30% ~ 85%^[37],本研究 N_{120} 、 N_{240} 处理对土壤 POC 的贡献率分别为 10.14% ~ 36.25%、12.57% ~ 51.41%,贡献率相对不高,这可能与 POC 属于非保护性有机质,表层土壤在耕作过程中易于矿化损失有关。

4 结 论

在两种不同前茬下施氮均提高了黄土高原半干旱偏润区农田土壤总有机碳 (TOC)、易氧化有机碳 (EOOC)、颗粒有机碳 (POC) 的含量,且以施氮量 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_{240}) 促进效果最为显著。冬油菜茬土壤总有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳的含量较冬小麦茬高。施氮对各有机碳组分贡献较大,其中以颗粒有机碳对施肥响应最明显,可以作为施肥管理措施下土壤有机碳变化的有效指示碳库。因此,适当施用氮肥是短期内快速提升土壤有机碳水平、增加土壤肥力的有效措施。

参 考 文 献:

- [1] 薛 蕊,刘国彬,潘彦平,等.黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J].中国农业科学,2009,42(4):1458-1464.
- [2] Lal R. Forest soils and carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005,220(1-3):242-258.
- [3] 龚 伟,颜晓光,蔡祖聪,等.长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响[J].应用生态学报,2008,19(11):2375-2381.
- [4] 赵丽娟,韩晓增,王守宇,等.黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力变化Ⅳ.有机碳组分的变化[J].应用生态学报,2006,17(5):817-821.
- [5] Partyka T, Hamkalo Z. Estimation of oxidizing ability of organic matter of forest and arable soil[J]. Zemdirbyste - Agriculture, 2010,97(1):33-40.
- [6] Vieira FCB, Bayer C, Zanatta JA, et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2007,96(1):195-204.
- [7] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use[J]. Geoder-

- ma, 2005, 124(1/2):143-155.
- [8] Tirol-Padre A, Ladha J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon[J]. Soil Science Society of American Journal, 2004, 68(3):969-978.
- [9] Saviozzi A, Levi Minzi R, Cardelli R, et al. A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils[J]. Plant and Soil, 2001, 233(2):251-259.
- [10] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3):513-519.
- [11] 刘正刚, 裴柏洋, 王宪帅, 等. 岷江上游干旱河谷不同土地利用类型的土壤有机碳和易氧化态碳特征[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3):24-27.
- [12] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay PK, et al. Soil organic carbon pools and productivity relationships for a 34 year old rice – wheat – jute agroecosystem under different fertilizer treatments[J]. Plant and Soil, 2007, 297(1/2):53-67.
- [13] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K. Soil organic carbon pools and productivity in relation to nutrient management in a 20 – year – old rice – ber seem agroeco system[J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 44(3):451-461.
- [14] 黄雪夏, 唐晓红, 魏朝富, 等. 利用方式对紫色水稻土有机碳与颗粒态有机碳的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(4):1277-1281.
- [15] Marriott EE, Wander M. Qualitative and quantitative differences in particulate organic matter fractions in organic and conventional farming systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(7):1527-1536.
- [16] 于建光, 李辉信, 陈小云, 等. 秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4):818-824.
- [17] Anonym. Fertilized to death[J]. Nature, 2003, 425:894-895.
- [18] 金继运, 何 萍, 刘海龙, 等. 氮肥用量对高淀粉玉米和普通玉米吸氮特性及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2004, 10(6):568-573.
- [19] 赵 营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2006, 12(5):622-627.
- [20] 王俊忠, 黄高宝, 张超男, 等. 施氮量对不同肥力水平下夏玉米碳氮代谢及氮素利用率的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(4):2045-2052.
- [21] 王宜伦. 超高产夏玉米氮肥运筹效应及其生理基础研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2010.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:107-108, 111 – 123.
- [23] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M, et al. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. Plant Soil, 1993, 155(1):155-156, 399-402.
- [24] Cambardella MR, Elliott ET. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3):777-783.
- [25] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9):2847-2854.
- [26] 吕 鹏, 张吉旺, 刘 伟, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2011, 17(4):852-860.
- [27] 易镇邪, 王 璞, 刘 明, 等. 不同类型氮肥与施氮量下夏玉米水、氮利用及土壤氮素表观盈亏[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1):63-67.
- [28] 高肖贤, 张华芳, 马文奇, 等. 不同施氮量对夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1):121-126.
- [29] Liu L, Song C, Yan Z, et al. Characterizing the release of different composition of dissolved organic matter in soil under acid rain leaching using three – dimensional excitation-emission matrix spectroscopy[J]. Chemosphere, 2009, 77(1):15-21.
- [30] Gregorich E G, Ellert B H, Drury C F. Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(2):472-476.
- [31] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview[J]. Advances in Agronomy, 2005, 85:221-268.
- [32] Conant RT, Six J, Paustian K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. II. changes in soil carbon fractions along a forest to pasture chronosequence[J]. Biology and Fertility of Soils, 2004, 40(3):194-200.
- [33] 佟小刚, 黄绍敏, 徐明岗, 等. 长期不同施肥模式对潮土有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2009, 15(4):831-836.
- [34] Ouédraogo E, Mando A, Stroosnijder L. Effects of tillage, organic resources and nitrogen fertilizer on soil carbon dynamics and crop nitrogen uptake in semi-arid West Africa[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 91:57-67.
- [35] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(1):353-360.
- [36] Carter MR, Kunelius HT, Angers DA. Soil structural form and stability, and organic matter under cool – season perennial grasses[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(4):1194-1199.
- [37] Cambardella CA, Gajda AM, Doran JW, et al. Estimation of particulate and total organic matter by weight loss – on – ignition[C]//Lal R, Kimble J M, Follett RF, et al. Assessment methods for soil carbon. Boca Raton, Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2001:349-359.