

土壤剧烈扰动条件下地面灌水对土壤呼吸的影响

于艳梅¹, 徐俊增², 杨士红^{2a}, 卫琦²

(1. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 河海大学 a. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室; b. 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 借助土箱试验观测研究土壤剧烈扰动条件下的土壤呼吸, 并分析灌溉管理与土壤扰动的综合影响。结果表明: 由于土壤剧烈扰动导致土壤呼吸通量出现短期的迅速增加, 土壤剧烈扰动后两个处理的土壤呼吸峰值均超过 $800 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 而且大部分时间在 $300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 高于大部分相关报道。对于 SI 处理, 在适宜的水分条件 ($102\% \text{ WHC}$) 和土壤剧烈扰动的协同作用下, 使土壤 CO_2 呼吸峰值超过了 $900 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。对于 SDI + SI 处理, 由于剧烈扰动的影响在非适宜的水分条件下出现了 $800 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以上的 CO_2 排放峰值, 土壤剧烈扰动后灌溉能够显著降低土壤呼吸通量, 灌水后随水分达到适宜范围 ($98\% \text{ WHC}$), 出现水分调控导致的另一个小高峰, 但本研究中水分高峰仅为土壤剧烈扰动后峰值的 67% 。

关键词: 土壤呼吸; 土壤扰动; 土壤含水率; 灌溉管理

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0226-06

Influence of surface irrigation on soil respiration under intensively disturbed soil

YU Yanmei¹, XU Junzeng², YANG Shihong^{2a}, WEI Qi²

(1. Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China;

2. a. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

b. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The paper studied the soil respiration under the condition of intensively disturbed soil by aid of incubation experiment and analyzed the influence of combined irrigation and soil disturbance. The results show that the intensive soil disturbance results in a short-term quick increase of soil respiration. After the soils of two treatment were intensively disturbed, their respiration peak values overhanded $800 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and were $300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ for most of the time and higher than that in most reports. For surface irrigation treatment, the peak of soil respiration was higher than $900 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ under the combined effect of both intensive soil disturbance and proper moisture conditions (about $102\% \text{ WHC}$). For deep water application treatment, a peak (higher than $800 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) appeared under the condition of intensive soil disturbance and the soil moisture of not being fit. The irrigation obviously decreased the amount of soil respiration after the soil was intensively disturbed. The soil moisture appeared another peak when the soil moisture reached the suitable range ($98\% \text{ WHC}$). But the peak of soil moisture in the research was about 67% of the peak after the soil was intensively disturbed.

Key words: soil respiration; soil disturbance; soil moisture; irrigation management

大气 CO_2 浓度升高引起的温室效应是导致全球变暖的重要原因之一。土壤有机碳库占陆地生态

系统碳库总量的 67% ^[1]。同时农业生态系统中的碳是全球碳库中最活跃的部分, 土壤呼吸是土壤碳

收稿日期: 2014-09-16; 修回日期: 2015-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51179051、51209066); 中央高校基本科研业务费项目 (2011B05514); 中国博士后科学基金项目 (2012M510122); 河海大学中央高校基本科研业务费项目 (2014B37914)

作者简介: 于艳梅 (1988-), 女, 内蒙古通辽人, 硕士, 研究方向: 节水灌溉理论与技术研究。

通讯作者: 徐俊增 (1980-), 男, 山东聊城人, 博士, 教授, 研究方向: 节水灌溉与农田生态效应研究。

输出的主要途径,土壤呼吸作用每年释放的 CO₂ 量可达 640 g/m²^[2],全球年土壤呼吸的碳排放约 79.3 ~81.8 ×10⁹ t^[3],是因化石燃料燃烧 CO₂ 排放量的 11 倍以上^[4]。因此,土壤呼吸对大气 CO₂ 浓度有很大的影响,是陆地生态系统碳收支的重要环节,确定土壤呼吸强度及其影响机理是碳循环研究的重要科学问题。

大量的研究表明,土壤扰动和土壤水分含量对土壤呼吸影响显著。土壤扰动能改善土壤的透气透水性,并使土壤从厌氧向好氧状态转变,同时有助于气体在土壤中的迁移扩散,使土壤营养物质产生迁移等^[5-11]。土壤水分对土壤呼吸的影响主要是通过 对植物和微生物的生理活动、微生物的能量供应和体内再分配、土壤的通透性和气体的扩散等的调节和控制来实现的^[10,12-15]。以往研究只关注于土壤扰动或土壤水分含量对土壤呼吸单因素方面的影响,对于土壤扰动后与灌溉相结合的影响还未见报道。因此,本文借助试验观测研究土壤扰动对土壤呼吸的影响,同时引入不同的灌溉方式,分析灌溉与土壤扰动的综合影响,对于准确的评估 CO₂ 排放,提出适合扰动土壤 CO₂ 减排的水分管理方案具有重要的理论意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试土壤

试验在江苏省南京市水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开展。该地区属亚热带季风气候,年平均气温 15.6℃,年平均降雨量 1 107 mm。供试土壤采自江苏省南京市蔬菜花卉科学研究所的塑料大棚(31° 56′ N, 118° 37′ E)。大棚内前期作物为番茄,在 2012 年 4 月 14 日移植并于 7 月 26 日收获。在移植前施入底肥:复合肥料 450 kg/hm² (N、P₂O₅ 和 K₂O 含量均为 15%),尿素 450 kg/hm²

(N 含量为 42%) 和有机肥 3 000 kg/hm² (有机质含量 > 30%,N + P₂O₅ + K₂O = 7%)。番茄收获后在 8 月 7 日采集土壤样本,土壤采回后风干,剔除植物残体,过 4 mm 筛,彻底混合后备用。土壤属性在表 1 中列出。在土箱(40 cm ×40 cm ×60 cm)的底部,一个透水管(内径 6mm,外包土工布防堵)埋在细砂和石子组成的反滤层内(6 cm 厚)。透水管的一端通过供水阀门连接马氏瓶,形成一个地下供水系统,另一端连接到排水阀门(图 1)。土壤按照设计的容重(地面以下 0 ~10 cm 和 10 ~50 cm 土壤的容重分别为 1.25 和 1.33 g/cm³)回填到 6 个土箱。并将箱子放置在避雨处以免降雨的影响。

1.2 试验设计

在 8 月 13 日填土完成后,于该日 20:00 对土箱供水。试验设 2 个处理:地面灌溉(SI)处理和地下供水+地面灌溉(SDI + SI)处理,每处理 3 个重复。SI 处理从地表灌水 22.4 L,湿润 0 ~40 cm 深度的土层;SDI + SI 处理则通过地下供水系统自地下补水 17.6 L,并于 8 月 18 日 14:00(试验开始后的 114 h)从地表灌入 6 L 水。采用矩形聚氯乙烯静态箱(40 cm ×40 cm ×40 cm)进行为期 11 d 的取样观测^[16],静态箱配有温度计。试验开始后每天的 10:00 进行定期采样,并且在试验开始后第 2 和第 4 天(即 DAB = 2 和 4)采集日变化样,日变化采样时间分别为 7:00、10:00、13:00、16:00 和 21:00。取样时,静态箱安放在底座的凹槽内并用水密封,采用 10 mL 注射器通过连接到静态箱气体管路和一个双通进行采样。每次采样时分别采集盖箱后 0、10、20 和 30 min 的 4 个气样,同时记录大气和静态箱内的温度。在第 2、4、6 和 10 d 的 10:00 前后通过土箱上的取样孔采集不同深度土样约 4 g,烘干法测定土壤重量含水率,并计算 0 ~5 cm 土壤含水率占田间持水量(WHC)的百分比^[17]。

表 1 土壤属性

不同粒径含量/%			SOC */	TN */	TP */	饱和含水率 θ _s /	田间持水量 θ _f /	pH
<0.002mm	0.02 ~0.002mm	0.02 ~2mm	(0.01g · g ⁻¹)	(0.01g · g ⁻¹)	(0.01g · g ⁻¹)	(0.01g · g ⁻¹)	(0.01g · g ⁻¹)	
29	48	23	1.82	0.14	0.03	40.9(36.2)	31.0(27.3)	6.24

注: * SOC、TN、TP 为土壤有机碳含量、总氮含量和总磷含量。40.9、31.0 分别为 0 ~10 cm 表层土壤的 θ_s 和 θ_f, 36.2、27.3 分别为 10 ~50 cm 深的土壤的 θ_s 和 θ_f。

1.3 CO₂ 浓度的测定及计算

气样中的 CO₂ 浓度采用安捷伦气象色谱分析仪(Agilent 7890A)测定,基于 4 个采样时刻的气体

CO₂ 浓度计算气体浓度随时间的变化率,采用下式等计算土壤呼吸通量^[18]。

$$F = \frac{dm}{dtA} = \frac{\rho V_{air}dC}{dt \cdot A}$$

$$= \frac{\mu \bar{P} \cdot H}{R(T + 273.2)} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

式中： F 为土壤 CO_2 呼吸通量， $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ； dm 为箱内 CO_2 质量变化量； ρ 为箱内 CO_2 的密度； A 为采样箱横截面积； H 为箱内有效高度； V_{air} 为箱内气体的体积； dC/dt 为箱内 CO_2 浓度随时间的变化率； μ 为 CO_2 摩尔质量（44.0 g/mol）； P 为箱内平均气压，对于非高海拔区可视 P 为标准大气压，即 $P = 1.01235 \times 10^5 \text{ Pa}$ ； R 为普适气体常数（8.31441 J/(mol · K)）； T 为箱内平均气温。

2 结果分析

2.1 不同灌水处理下土壤呼吸通量的日变化

不同灌水处理的土壤呼吸通量均表现为明显的单峰型日变化规律（图 2）。DAB = 2 时 SI 和 SDI + SI 处理土壤呼吸峰值均出现在 13:00，SI 处理土壤呼吸峰值比 SDI + SI 处理的峰值低 28.6%。而 DAB = 4 时土壤呼吸通量的峰值分别出现在 13:00 和 16:00，SDI + SI 处理土壤呼吸通量的峰值比 SI 的峰值处理低 13.5%。DAB = 2 的 SDI + SI 处理土壤呼吸通量始终高于 SI 处理，SDI + SI 处理的土壤呼吸通量是同时期 SI 处理的 1.2 ~ 2.9 倍。由 DAB

= 4 的土壤呼吸日变化可以看出，SI 处理土壤呼吸通量在达到峰值前一直大于 SDI + SI 处理，随后 SDI + SI 处理的土壤呼吸通量高于 SI 处理。两天的土壤呼吸日变化相比，SI 处理在 DAB = 2 时土壤水分很高（108% WHC），土壤呼吸通量较低，DAB = 4 时表层土壤的水分（102% WHC）降低到更适宜土壤呼吸的区间（100% WHC 左右）^[19-20]，土壤呼吸通量也更高；SDI + SI 处理的土壤呼吸通量在这两天比较接近，但 SDI + SI 处理表层水分（14% WHC 和 38% WHC）远低于适合土壤呼吸的土壤含水量范围，土壤呼吸通量依然比较高，原因在于土壤的剧烈扰动。

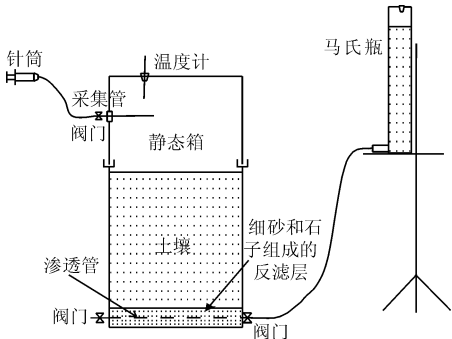
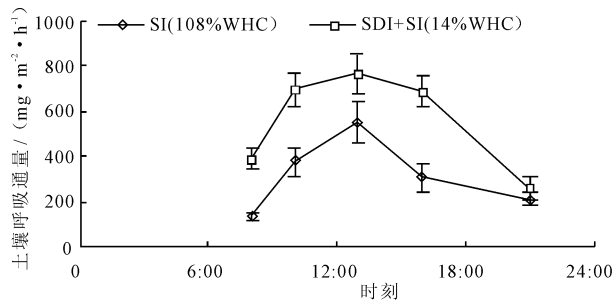
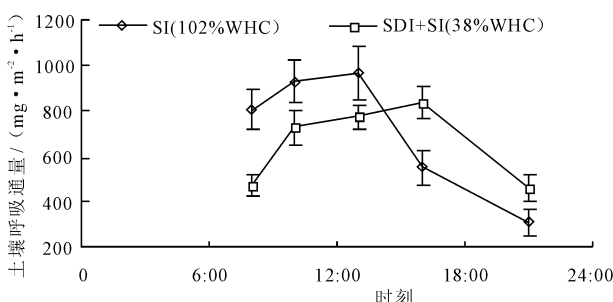


图 1 试验装置示意图



(a) DAB=2



(b) DAB=4

图 2 DAB = 2 和 DAB = 4 不同灌水处理土壤呼吸日变化

2.2 不同灌水处理下土壤 CO₂ 呼吸通量变化规律

在 SDI + SI 处理地表灌水之前，SI 和 SDI + SI 处理土壤呼吸通量随时间的变化规律相似（图 3）。由于 SI 处理试验开始时表层土壤含水率较高，土壤 CO_2 呼吸通量从较低（ $< 200 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ）逐渐增加，到 DAB = 4 的 13:00 时达到最大值（ $971.9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ），此后逐渐下降。出现峰值时（DAB = 4）0 ~ 5 cm 土壤含水率为 102% WHC，接近田间持水量。以往研究也认为，对于土壤呼吸，最优的土壤水分状况通常是接近田间持水率，因为此时土壤中大孔隙多数被空气所充填，这有利于 O_2 的扩散，而且小孔隙的空隙大多被水分所占据，便于可溶性

基质进行扩散，当土壤处于过干或过湿状态时，土壤呼吸会受到抑制^[12]。此时 SI 处理的土壤呼吸通量的峰值是 SDI + SI 处理的 1.2 倍，表明土壤扰动与适宜的水分含量的共同作用进一步加强了土壤呼吸作用。而对于 SDI + SI 处理的土壤呼吸通量自试验开始一直保持很高，虽然这个时候表层土壤的土壤含水率（0 ~ 5 cm 土壤含水率 WHC 为 14% 和 38% WHC）远低于通常认为的土壤呼吸最适含水率的范围，而且在这段时间里的土壤呼吸通量是 SI 处理的 0.6 ~ 3.7 倍。而 SI 处理的土壤呼吸通量在 DAB = 4 时超过了 SDI + SI 处理，这说明由于土壤产生的强烈扰动，促进了土壤有机质的分解，在前期释放较

多的 CO_2 ,但随着时间的推移,SDI + SI 处理可供分解的土壤活性有机碳不断减少,导致土壤呼吸通量逐步降低^[19]。在地面灌水之后,SDI + SI 处理土壤 CO_2 呼吸通量急剧下降到 18. 99 ~ 274. 30 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,与前期排放相比平均下降 79%,且仅为同时期 SI 处理的土壤呼吸通量的 38% ~ 95%。在 120 ~ 280 h 时,随着灌水后土壤水分的再次重新分布,水分逐渐降低到更适合土壤呼吸的范围(表 2),土壤呼吸通量再次逐渐升高,出现了水分调控所引起的土壤呼吸通量高峰,但此时的峰值不足灌水前强烈扰动峰值的 1/3。

3 讨 论

本研究中由于土壤的强烈扰动,SI 和 SDI + SI 两个处理的平均土壤 CO_2 呼吸通量达 437. 9 和 425. 7 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,峰值分别为 971. 9 和 840. 5 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。通过对已有研究的土壤呼吸峰值的统计表明,森林砍伐、放牧、草地开垦、翻耕、水分管理、施肥管理等不同人为活动因素均对土壤呼吸产生了影响^[2,5-11,21-22]。土壤 CO_2 呼吸峰值因不同处理差距较大,大部分土壤呼吸峰值小于 500 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,也有部分土壤呼吸峰值超过 1000 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,甚至更高。通常不同植被下的土壤呼吸通量是:林地 > 作物及人工草地 > 裸地^[23],有作物的土壤呼吸通量比裸地高出一倍^[2]。虽然本研究没有种植任何作物,但由于土壤扰动导致土壤呼吸通量迅速增加,土壤扰动后两个处理的土壤 CO_2 呼吸峰值均超过 800 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而且大部分时间在 300 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。远高于大部分相关报道(表 3),尤其是 SDI + SI 处理在土壤水分远低于适宜土壤呼吸的含水率情况下出现了高达 840. 5 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的排放峰值,证明土壤扰动导致了土壤呼吸的短期剧增,而适宜水分条件下 SI 处理土壤呼吸峰值更是高达 971. 9 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,是土壤扰动与适宜土壤水分共同作用的结果。

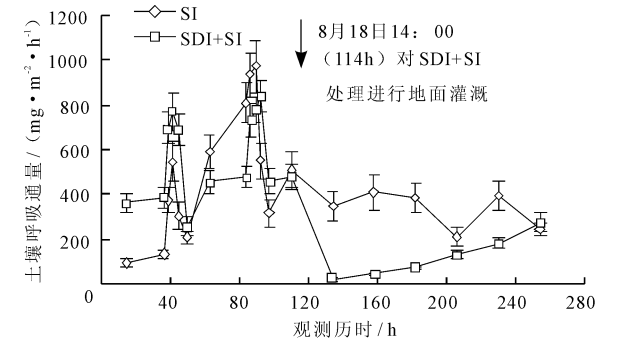


图 3 不同灌水处理土壤 CO_2 呼吸通量的变化规律

表 2 不同灌水处理 0 ~ 5 cm 土壤含水率变化					%
处理		DAB = 2	DAB = 4	DAB = 6	DAB = 10
SI	0.01 g/g	0.33	0.32	0.31	0.27
	% WHC	108	102	100	88
SDI + SI	0.01 g/g	0.04	0.12	0.36	0.30
	% WHC	14	38	115	98

注:SI、SDI + SI 中 0.01 g/g 表示绝对的重含水率; % WHC 表示相对含水率高低。

翻耕、森林砍伐等土壤扰动均会导致土壤呼吸的增加。杨玉盛等^[5]研究结果表明,杉木林皆伐后前 4 个月土壤呼吸显著高于未伐地。万运帆等^[8]对冬闲农田进行翻耕前后温室效应比较发现,翻耕后短期内存在 1 个二氧化碳排放峰,显著增加 CO_2 的排放通量。Chatskikh 等^[9]研究指出,与常规耕作相比,免耕减少耕作的土壤扰动,使土壤二氧化碳排放降低了 23%。汤亿等^[10]在晋中盆地进行了灌溉和翻耕条件下土壤呼吸的比较测定,结果表明翻耕后土壤呼吸是未翻耕的 2 ~ 3 倍。本研究中土壤扰动对土壤呼吸也产生了显著的影响,虽然没有施肥、水分也不是适宜的范围,出现了土壤呼吸的高峰,这与取土、风干、粉碎、过筛、填装等一系列的剧烈扰动等因素有关。

土壤湿度的变化是影响土壤呼吸通量的重要因素。在一定的水分含量范围内, CO_2 释放量与水分含量呈极显著相关关系。Linn 等^[13]认为土壤 CO_2 通量在干燥条件下由于水分限制而降低,在土壤湿度中等水平时最大,而土壤湿度再增加时由于通气限制又下降。夏国芳等^[14]认为土壤含水量在 30% WHC ~ 90% WHC 时, CO_2 排放通量随土壤水分含量的升高而升高,且在高土壤有机碳含量条件下, CO_2 的排放通量和总排放量随水分增加而升高的幅度更大。Ruser 等^[24]表明德国南部未压实的细壤土在 40%、60%、70% 和 90% WFPS 下, CO_2 排放无显著差异。Papendick 等^[15]研究指出,在最适土壤含水量时土壤呼吸通量最高,最适含水量通常接近田间持水率。本研究中,表层湿润以后 SI 和 SDI + SI 两个处理土壤呼吸通量均随土壤水分降低而出现短期的高峰,最适含水量分别为 102% WHC 和 98% WHC,均接近于土壤田间持水率。但是在土壤表层湿润以前,SDI + SI 是在土壤极干条件下出现了更高的峰值,表明扰动的土壤可以在较低含水率下维持较高的土壤呼吸,原因可能是土壤扰动使土壤的通透性增加,从而导致土壤微生物活动剧烈,使土壤

呼吸增加。同时,土壤扰动使土壤的团粒结构破坏,使其中的 CO₂ 释放,也是导致土壤呼吸增加的一个原因^[10]。

图 3 还表明,SI 处理在适宜的水分条件和土壤扰动的协同作用下,土壤 CO₂ 呼吸通量出现了超过 900 mg/(m²·h)的峰值。对于 SDI + SI 处理,土壤扰动后灌溉能够显著降低土壤呼吸通量,但是随水分达到适宜范围,还会出现水分调控导致的另一个高峰,但从本研究来看,水分高峰仅为强烈扰动后峰值的 67%。

地表灌溉导致土壤呼吸通量短期下降原因可能是:水分增加使土壤的通透性变差,CO₂ 在土壤中的

扩散阻力因此增大,导致灌水后实际测定的土壤 CO₂ 排放量减少^[12-20]。

农业土壤是大气 CO₂ 的源,也可以成为一个重要的碳汇。不合理的农业土地利用和频繁的耕作加剧土壤扰动,增加了土壤二氧化碳的排放通量^[7]。通过以上关于灌溉与土壤扰动对土壤呼吸的综合影响的分析,从水分管理角度提出适合扰动土壤温室气体减排的方案:强扰动后立即灌水,并且使土壤在更长时间内保持远高于田间持水量的含水率,可能会减少强扰动导致的短期影响,本研究第 5 d 进行的地面灌溉也能够降低此后一段时间内的土壤呼吸,后期如何进行水分管理有待进一步研究。

表 3 土壤 CO ₂ 呼吸峰值				mg/(m ² · h)
地点	土壤类型	峰值	峰值出现的情景	参考文献
福建	轻粘质红壤,SOM = 19.55	310.60	在皆伐后 3 个月	杨玉盛 等 ^[5] , 2005
	g/kg, TN = 0.69 g/kg, TP = 0.35 g/kg			
内蒙古	栗钙土	323.50	长期过度放牧,土壤水分含量为 2.9 ~ 14.4, 气温为 0.2 ~ 38.80℃	贾丙瑞等 ^[6] , 2005
长白山	白浆化暗棕色森林土	1004.26 **	土壤开垦时间 25 年左右,垦前为原始红松 针阔混交林	王旭等 ^[7] , 2006
北京	褐潮土,TN = 0.354%, TP = 0.012%	80	对冬季休闲地翻耕,气温在 10℃ 左右,在翻 耕后 36 ~ 48 h 之间达到最大。	万运帆等 ^[8] , 2004
丹麦	沙壤土	1466.67 ***	翻耕后,土壤含水率为 0.25 ~ 0.35 m ³ /m ³	Chatskikh 等 ^[9] , 2007
山西		3053.95 **	常规灌溉,第三天进行翻耕	汤亿等 ^[10] , 2009
		1357.49 **	不灌溉,第三天进行翻耕	
山东	粉砂和轻壤,SOM = 0.6% ~ 1.0%, TN = 0.05% ~ 0.065%	616.79	土壤含水率为 30.1%	陈述悦等 ^[2] , 2004
四川	中壤,林地、草地、旱地, SOM = 19.26、13.71、	577.97	林地为柏木林	王小国 等 ^[11] , 2007
	11.98 g/kg	584.18	草地种植的是黑麦草	
南京	淋溶土,SOM = 4.9 g/kg, TN = 0.6 g/kg	2794.37 *	种植玉米,施氮肥 300 mg/kg	杨兰芳等 ^[21] , 2005
		132 *	裸地,施氮肥 300 mg/kg	
南京	重壤土,SOC = 10.56, TN = 0.95 g/kg	1096.33 *	种植大豆	杨兰芳等 ^[22] , 2004
		152.53 *	裸地	

注: * 数据从 1 mg C / (m² · h) = 3.67 mg CO₂ / (m² · h) 换算过来的。 ** 数据从 CO₂ 1 μmol / (m² · s) = 158.4 mg / (m² · h) 换算过来的。 *** 数据从 1 kg C / (hm² · h) = 366.67 mg CO₂ / (m² · h) 换算过来的。

4 结 语

研究不同水分管理下扰动土壤的土壤呼吸变化

规律,表明:由于土壤扰动导致土壤呼吸通量短期内迅速增加,土壤扰动后两个处理的土壤 CO₂ 呼吸通量峰值均超过 840 mg/(m²·h),而且大部分时间在

300 mg/(m² · h), 高于大部分相关报道。对于 SI 处理, 在适宜的水分条件(102% WHC) 和土壤扰动的协同作用下, 使土壤 CO₂ 呼吸通量峰值高达 971.9 mg/(m² · h)。对于 SDI + SI 处理, 在土壤水分远低于适宜土壤呼吸的含水率情况下, 由于土壤扰动出现了高达 840.5 mg/(m² · h) 的排放峰值, 土壤扰动后灌溉能够显著降低土壤呼吸通量, 但是随水分达到适宜范围(98% WHC), 还会出现水分调控导致的另一个高峰, 但从本研究来看, 水分高峰仅为强烈扰动后 CO₂ 释放峰的 67%。在土壤剧烈扰动后立即灌水, 并使土壤在更长时间内保持远高于田间持水量的含水率, 可能会减少强扰动导致的短期影响。

参考文献:

- [1] Shi Peili, Zhang Xianzhou, Zhong Zhiming, et al. Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3-4): 220-233.
- [2] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1552-1560.
- [3] Rich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 800-812.
- [4] Fang C, Moncrieff J B. A model for soil CO₂ production and transport 1: Model development[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 95(4): 225-236.
- [5] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 584-590.
- [6] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子[J]. *环境科学*, 2005, 26(6): 1-7.
- [7] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 长白山红松针阔混交林与开垦农田土壤呼吸作用比较[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(6): 887-893.
- [8] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH₄ 和 CO₂ 排放通量的影响初探[J]. *中国农业气象*, 2004, 25(3): 8-10.
- [9] Chatskikh D, Olesena J E. Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emission from loamy sand under spring barley[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 97(1): 5-18.
- [10] 汤亿, 严俊霞, 孙明, 等. 灌溉和翻耕对土壤呼吸速率的影响[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(6): 2625-2627+2671.
- [11] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [12] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.
- [13] Linn D W, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1267-1272.
- [14] 夏国芳, 张雷, 魏湜, 等. 温度与土壤水分对有机碳分解速率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 57-59.
- [15] Papendick R I, Campbell G S. Theory and measurement of water potential[C]// Parr J F, Gardner W R, Elliott L F. *Water potential relations in Soil microbiology*. Madison WI, USA: Soil Science Society of America, 1981: 1-22.
- [16] Johnson-Beebout S E, Angeles O R, Alberto M C R, et al. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants[J]. *Geoderma*, 2009, 149(1-2): 45-53.
- [17] Liu Xiaozhong, Wan Shiqiang, Su Bo, et al. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 213-223.
- [18] Yuste J C, Ma S, Baldocchi D D. Plant-soil interactions and acclimation to temperature of microbial-mediated soil respiration may affect predictions of soil CO₂ efflux[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3): 127-138.
- [19] Cardon Z G, Hungate B A, Cambardella C A. Contrasting effects of elevated CO₂ on old and new soil carbon pools[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(3): 365-373.
- [20] Rochette P, Desjardins R L, Pattey E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(2): 189-196.
- [21] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 9-15.
- [22] 杨兰芳, 蔡祖聪. 不同生长期盆栽大豆的土壤呼吸昼夜变化及其影响因子[J]. *生态学报*, 2004, 24(12): 2955-2960.
- [23] 马秀梅, 朱波, 韩广轩, 等. 土壤呼吸研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(Z1): 491-495.
- [24] Ruser R, Flessa H, Russow R. Emission of N₂O and CO₂ from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction soil moisture and rewetting[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(2): 263-274.