

杜爱林, 傅丰贝, 李伏生. 赤红壤碳库管理的滴灌施氮模式研究[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 14-20.
DU Ailin, FU Fengbei, LI Fusheng. Drip nitrogen fertigation strategy for carbon pool management in latosolic red soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(2): 14-20.

赤红壤碳库管理的滴灌施氮模式研究

杜爱林, 傅丰贝, 李伏生

(广西大学 农学院/广西喀斯特地区节水农业新技术院士工作站/
广西高校作物栽培学与耕作学重点实验室, 广西 南宁 530005)

摘要:【目的】探索有利于赤红壤碳库管理的滴灌施氮模式。【方法】通过模拟滴灌系统的盆栽试验, 研究了 3 种滴灌方式和 5 种施氮处理对土壤有机碳和活性有机碳含量、碳库管理指数和酶活性的影响。【结果】与 N0-CDI(土壤施氮量为 0 结合常规滴灌) 相比, N2-ADI(滴灌施氮量 $0.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 结合交替滴灌) 处理土壤有机碳含量提高 55.2%, 土壤活性有机碳含量提高 111.8%, 土壤碳库管理指数提高 90.5%。同时, 土壤有机碳含量、活性有机碳含量和碳库管理指数与过氧化氢酶、脲酶和转化酶活性之间有显著相关性。【结论】滴灌施氮量 $0.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 结合交替滴灌处理是赤红壤碳库管理的最优滴灌施氮模式。

关键词: 滴灌施氮; 赤红壤; 土壤酶活性; 土壤有机碳; 碳库管理指数
中图分类号: S275.6; S143.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)02-0014-07

Drip nitrogen fertigation strategy for carbon pool management in latosolic red soil

DU Ailin, FU Fengbei, LI Fusheng

(College of Agriculture, Guangxi University/ Guangxi Academician Work Station of the New Technology of Water-saving Agriculture in Karst Region/Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Crop Cultivation and Tillage, Nanning 530005, China)

Abstract: 【Objective】To explore the drip nitrogen fertigation strategy that is beneficial for carbon pool management in latosolic red soil. 【Method】Pot experiments imitating the fertigation system were conducted. The effects of three drip irrigation methods and five nitrogen treatments on the contents of organic carbon and active organic carbon, carbon pool management index and enzyme activity in soil were investigated. 【Result】Compared with N0-CDI(The amount of nitrogen applied to soil was 0, combined with conventional drip irrigation), N2-ADI (The amount of drip nitrogen fertigation was $0.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, combined with alternate drip irrigation) increased soil organic carbon content by 55.2%, soil active organic carbon content by 111.8% and carbon pool management index by 90.5%. Meanwhile, the organic carbon content, active organic carbon content and carbon pool management index significantly correlated with catalase, urease and invertase activities in soil. 【Conclusion】The drip nitrogen fertigation of $0.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ combined with alternate drip irrigation is the optimal drip nitrogen fertigation strategy for carbon storage management in latosolic red soil.

Key words: drip nitrogen fertigation; latosolic red soil; soil enzyme activity; soil organic carbon; carbon pool management index

土壤有机碳是土壤肥力评价的一项重要指标^[1]。Lefroy 等^[2]将能被 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的有机碳称为活性有机碳, 不能被氧化的称为非活性有机碳, 并提出用土壤碳库管理指数 (CPMI) 来表征土壤管理措施引起的土壤有机碳变化。活性有机碳是占土壤有机碳中比例较小而周转速率较快的部分, 在土壤有机碳中对环境的变化最敏感, 可以指示土壤有机碳的早期变化^[3]。因此土壤有机碳和活性有机碳在维持土壤肥力及土壤碳贮量变化方面具有重大意义^[4]。

由于大量施用化学氮肥, 加快了土壤原有有机碳的消耗, 使积累在土壤中的有机碳总量减少^[5]。土壤水分会影响土壤有机碳的变化, 当土壤水分不足时, 会导致土壤通气性加强, 促进土壤呼吸作用和有机碳矿化分解, 从而降低土壤有机碳含量^[6-7]。唐首锋等^[8]研究表明, 在 0~15 和 15~30 cm 土层, 3 种灌溉处理土壤有机碳含量表现为滴灌>渗灌>沟灌。此外, 土壤酶参与了土壤有机碳的分解和转化过程, 其活性高低可反映土壤有机碳转化强弱^[9]。

广西赤红壤面积达 503 万 hm², 占土地总面积的 21.25%^[10]。广西大部分地区虽然年降雨量充沛, 但是常出现季节性干旱, 而滴灌施肥是将施肥与滴灌结合在一起的一项农业新技术, 已被广泛应用^[11]。赤红壤的酸碱缓冲能力相对较弱, 邓兰生等^[12]在研究滴灌施氮对赤红壤酸化的影响中发现, 滴施尿素、硫酸铵、硝酸铵后赤红壤各土层 pH 均有一定程度地下降, 下降幅度为: 硫酸铵>硝酸铵>尿素。徐明岗等^[13]研究发现, 施肥对红壤活性有机质组分的影响显著。因此, 在不同水肥条件下, 研究赤红壤有机碳的变化对土壤碳库的影响有重要意义。

为探索有利于赤红壤碳库管理的滴灌施氮模式, 本研究通过模拟滴灌系统的盆栽试验, 研究了不同滴灌方式和施氮处理对土壤有机碳和活性有机碳含量、碳库管理指数和酶活性的影响, 并分析土壤有机碳含量、活性有机碳含量、碳库管理指数和酶活性的关系, 以期对赤红壤农田固碳的水肥管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验在广西大学农学院网室进行, 该网室可以透光、通风、遮雨, 网室内光照、温度和湿度等环境因素与室外基本一致。供试土壤为赤红壤, 采自广西大学农科教学实习基地, 经风干、碾碎, 过 5 mm 筛, pH5.32, 碱解氮 31.55 mg·kg⁻¹(1 mol·L⁻¹NaOH 扩

散法), 速效磷 33.26 mg·kg⁻¹(0.5 mol·L⁻¹NaHCO₃ 法), 速效钾 100.32 mg·kg⁻¹(0.5 mol·L⁻¹ NH₄OAc 法), 田间持水量为 29.5%。供试玉米 *Zea mays* L. 品种为‘家甜糯 11’。

1.2 试验方法

在聚乙烯塑料桶 (上部开口内径 35 cm, 底部内径 26 cm, 高 29 cm) 中部用塑料薄膜隔开, 以防两侧水分交换, 薄膜两侧各装风干土 10 kg, 每桶共装风干土 20 kg, 塑料桶上缘薄膜中部各剪一个小口, 种植已催芽的玉米。

设 3 种滴灌方式和 5 种施氮处理, 完全方案设计, 共 15 个处理, 每个处理重复 3 次, 共 45 盆, 随机区组排列。滴灌方式设常规滴灌 (CDI, 每桶 2 个滴头分别对玉米植株两侧土壤灌水或灌水施肥)、交替滴灌 (ADI, 本次用 1 个滴头对植株其中一侧土壤灌水或灌水施肥, 下次用另一个滴头对植株另一侧土壤进行灌水或灌水施肥, 如此交替进行) 和固定滴灌 (FDI, 每次用 1 个滴头固定对玉米植株一侧土壤灌水或灌水施肥, 另一侧土壤则不灌水或不灌水施肥)。试验期间, 加肥料时, 事先按设计要求配好肥料溶液, 肥料溶液注入模拟滴灌系统的输液袋, 将输液袋挂在距地面 2 m 高处, 溶液由塑料软管导出, 经软管由滴头滴入土壤中, 滴头距离植株根系 15 cm, 流速为 0.7 L·h⁻¹。不加肥料时, 按上述方法只灌自来水。

试验设 5 个施氮处理, 分别用 N0、N1、N2、N3 和 N4 表示, 除 N0 处理不施氮肥外, N1~N4 处理总施氮量均为 0.20 g·kg⁻¹, 追施氮量依次按 0、100%、90%、80% 和 70% 的总施氮肥比例进行, 具体追施氮量分别为 0、0.20、0.18、0.16、0.14 g·kg⁻¹。除 N0 不追施氮肥外, 其余处理按上述灌水施肥方法, 通过输液袋进行滴灌施氮。其中苗期施氮占滴灌施氮量的 30%, 穗期占 40%, 花粒期占 30%, 每个时期平均分 2 次施入, 共计 6 次。N 肥作追肥的比例、方式和日期按表 1 实施。N2、N3 和 N4 处理中, 部分氮肥用作基肥, 所有处理的 P 肥 (0.15 g·kg⁻¹) 和 K 肥 (0.20 g·kg⁻¹) 全部作基肥, 装盆时与土壤混匀。氮肥用尿素 (N 质量分数为 46%), 磷肥用磷酸二氢钾 (P₂O₅ 质量分数为 52%), 钾肥用磷酸二氢钾 (K₂O 质量分数为 34%) 和氯化钾 (K₂O 质量分数为 60%)。

1.3 试验管理

4 月 6 日, 按照试验设计将土壤、部分氮肥和全部 P、K 肥混匀装入试验桶, 4 月 7 日每桶播 4 粒已催芽的玉米种子, 长到“四叶一心”时, 间苗定苗,

表 1 甜糯玉米各处理滴灌施氮情况

Table 1 Drip nitrogen fertigation of different treatments for sweet-waxy maize

处理 Treatment	滴灌施 N 量/(g·kg ⁻¹) Amount of drip irrigated N	占 N 总量比例/% Percentage of drip irrigated N in total N applied	各追肥日期的 N 肥比例 ¹⁾ /%					
			Percentage of N applied at different topdressing dates					
			04-30	05-20	05-31	06-07	06-17	06-26
N0	0	0	0	0	0	0	0	0
N1	0.20	100	15	15	20	20	15	15
N2	0.18	90	15	15	20	20	15	15
N3	0.16	80	15	15	20	20	15	15
N4	0.14	70	15	15	20	20	15	15

1) 04-30、05-20: 拔节期;05-31、06-07: 孕穗期;06-17、06-26: 花粒期
1) 04-30, 05-20: Jointing stage; 05-31, 06-07: Booting stage; 06-17, 06-26: Flowering-maturing stage

每桶留长势均匀的玉米苗 1 株。4 月 27 日(播后 20 d), 对供试玉米进行控水处理, 常规滴灌土壤水分下限为田间持水量的 70%, 上限为田间持水量的 80%, 当含水量降至或接近该处理水分下限时进行灌水, 灌水至水分控制上限。根据作物生长和天气情况, 每隔 1~2 d 于下午称量 CDI 处理桶质量, 用水量平衡法确定所需的灌水量。ADI 和 FDI 各施 N 处理每次灌水量按常规滴灌相应施 N 处理灌水量的 80% 进行滴灌。每次灌水量用量筒量取, 并记录各处理灌水量。7 月 11 日试验结束。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤碳库测定 土壤有机碳(SOC)用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定^[14]; 土壤活性有机碳(LOC)用浓度 333 mmol·L⁻¹的高锰酸钾氧化土样, 并测 D_{565 nm} 值^[15]。

本试验将不施 N 肥处理土壤(N0)作为对照土壤。碳库指数及碳库管理指数等相关指标参照徐明岗等^[16]的方法计算, 计算公式如下:

非活性有机碳含量 = 有机碳含量-活性有机碳含量, (1)

碳库指数(I_{CP}) = 土壤有机碳含量/参考土壤有机碳含量, (2)

碳库活度(A) = 活性有机碳含量/非活性有机碳含量, (3)

碳库活度指数(I_A) = 碳库活度/参考碳库活度, (4)

碳库管理指数(I_{CPM}) = 碳库指数/碳库活度指数×100。 (5)

1.4.2 土壤酶活性测定 过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定, 脲酶活性用苯酚-次氯酸钠比色法测定, 转化酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[17]。

1.5 数据处理

显著性检验用方差分析法, 方差分析包括不同

施氮处理、滴灌方式以及两者间的交互效应, 分析结果用 P 值表示 (P<0.05, 显著; P<0.01, 极显著; P>0.05, 不显著), 用 SPSS 20.0 软件进行分析。多重比较采用 Duncan’s 法。用 Pearson 法分析了土壤有机碳含量、活性有机碳含量和碳库管理指数与酶活性的相关性系数。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌方式和施氮处理对土壤碳库的影响

2.1.1 有机碳含量 由表 2 可知, 滴灌方式对土壤有机碳(SOC)含量的影响极显著。与常规滴灌(CDI)相比, N2 处理下, 交替滴灌(ADI)土壤 SOC 含量比 CDI 方式提高 9.7%, 差异显著; 与固定滴灌(FDI)相比, N1 和 N2 处理下, ADI 方式土壤 SOC 含量比 FDI 方式分别提高 15.4% 和 18.8%, 差异显著。

施氮处理对 SOC 含量的影响极显著。与 N0 相比, N1~N3 处理的 SOC 含量均显著提高。CDI 方式下, N2 处理的 SOC 含量比其他施氮处理提高 11.3%~41.4%; ADI 方式下, N2 处理的 SOC 含量较其他施氮处理提高 16.1%~50.6%; FDI 方式下, N2 处理的 SOC 含量较 N0、N1 和 N4 处理分别提高 33.0%、12.8% 和 22.5%。

施氮处理与滴灌方式的交互作用对 SOC 含量的影响显著, 此外, 不同处理相比, 以 N2-ADI 处理的 SOC 含量最高。

2.1.2 活性有机碳含量 表 2 表明, 滴灌方式对土壤活性有机碳(LOC)含量有极显著的影响。与 CDI 方式相比, N1~N4 处理时 ADI 方式的土壤 LOC 含量提高 18.6%~21.1%, 差异显著; 与 CDI 方式相比, N1~N3 处理时 FDI 方式的土壤 LOC 含量降低 16.4%~22.1%, 差异显著。

施氮处理对土壤 LOC 含量的影响极显著。与

表 2 不同滴灌方式和施氮处理对土壤碳库的影响¹⁾

Table 2 Effects of different drip irrigation methods and nitrogen treatments on soil carbon pool

施氮处理 Nitrogen treatment (N)	滴灌方式 Drip irrigation method (DIM)	w/(g·kg ⁻¹)		碳库活度 Activity of carbon pool (<i>A</i>)	碳库活度指数 Activity index of carbon pool (<i>I_A</i>)	碳库指数 Carbon pool index (<i>I_{CP}</i>)	碳库管理指数 Carbon pool management index (<i>I_{CPM}</i>)
		有机碳 Soil organic carbon	活性有机碳 Labile organic carbon				
N0	CDI	10.62±0.04h	0.85±0.06fgh	0.09±0.01cdefg	1.00±0bc	1.00±0g	100.00±0g
	ADI	10.94±0.10gh	0.97±0.05def	0.10±0.01bcde	1.00±0bc	1.00±0g	100.00±0g
	FDI	10.43±0.04h	0.76±0.02h	0.08±0efg	1.00±0bc	1.00±0g	100.00±0g
N1	CDI	12.92±0.07cdef	1.10±0.01cde	0.09±0bcdef	1.09±0.09abc	1.22±0.01cdef	132.20±11.40cde
	ADI	14.20±0.84bc	1.33±0.03b	0.10±0.01bcd	1.08±0.14abc	1.30±0.08bcd	138.54±9.80bcd
	FDI	12.30±0.16efg	0.92±0.03fgh	0.08±0.01efg	1.03±0.05bc	1.18±0.02def	120.99±4.72cdef
N2	CDI	15.02±0.03b	1.49±0.06b	0.11±0.01ab	1.27±0.05a	1.41±0ab	179.50±6.96a
	ADI	16.48±0.42a	1.80±0.05a	0.12±0a	1.27±0.04a	1.51±0.05a	190.49±6.95a
	FDI	13.87±1.16bcd	1.16±0.06c	0.09±0bcdef	1.17±0.09ab	1.33±0.12bc	154.44±3.65b
N3	CDI	13.49±0.60cde	1.13±0.10cd	0.09±0.01cdefg	1.06±0.06bc	1.27±0.05cd	133.77±2.31cde
	ADI	13.82±0.41bcd	1.34±0.02b	0.11±0abc	1.10±0.04abc	1.26±0.04cd	139.63±8.93bc
	FDI	12.78±0.07def	0.89±0.06fgh	0.07±0.01g	0.95±0.06c	1.23±0cde	116.61±7.15efg
N4	CDI	11.61±0.10fgh	0.95±0.04efg	0.09±0defg	1.02±0.05bc	1.09±0.01efg	112.01±5.25fg
	ADI	12.15±0.20efg	1.15±0.08c	0.10±0.01bcd	1.08±0.03abc	1.11±0.01efg	119.49±2.42defg
	FDI	11.32±0.10gh	0.80±0.04gh	0.08±0fg	0.96±0.05bc	1.09±0.01fg	104.87±6.38fg
<i>P</i>	N	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	DIM	<0.001	<0.001	<0.001	0.104	0.045	<0.001
	N×DIM	0.042	0.053	0.914	0.978	0.607	0.319

1) 表中数据为平均值±标准误, 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

1) The values in the table are mean ± standard error, and different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)

N0 处理相比, CDI 方式时 N1~N3 处理的土壤 LOC 含量提高 29.4%~43.0%, FDI 方式时 N2 处理的土壤 LOC 含量提高 52.6%, ADI 方式时 N1~N4 处理的 LOC 含量提高 18.6%~85.6%, 差异均显著。

施氮处理与滴灌方式的交互作用对土壤 LOC 含量的影响不显著。

此外, 不同处理相比, 以 N2-ADI 处理的土壤 LOC 含量最高。

2.1.3 碳库管理指数 由表 2 可知, 滴灌方式对碳库活度指数的影响不显著, 而对碳库活度、碳库指数和碳库管理指数的影响显著或极显著。与 FDI 方式相比, N1~N3 处理时 ADI 方式的土壤碳库活度提高 25.0%~57.1%, N2 和 N3 处理时 ADI 方式的碳库管理指数分别提高 23.3% 和 19.7%。

施氮处理对碳库活度、碳库活度指数、碳库指数和碳库管理指数均有极显著的影响。与 N0 处理

相比, ADI 方式时 N2 处理的土壤碳库活度提高 20.0%, CDI 方式时 N1~N3 处理的碳库管理指数提高 32.2%~79.5%, ADI 方式时 N1、N2 和 N3 处理的碳库管理指数分别提高 38.5%、90.5% 和 39.6%, FDI 方式时 N1 和 N2 处理的碳库管理指数分别提高 21.0% 和 54.4%, 均达显著水平。

此外, 不同处理相比, N2-ADI 处理的土壤碳库管理指数最高。

2.2 不同滴灌方式和施氮处理对土壤酶活性的影响

2.2.1 过氧化氢酶活性 由表 3 可知, 滴灌方式和施氮处理对土壤过氧化氢酶活性均有极显著的影响。与 CDI 方式相比, N2 处理时 ADI 方式的土壤过氧化氢酶活性提高 12.3%, 差异显著。

与 N0 相比, CDI 方式时 N2 处理的土壤过氧化氢酶活性提高 23.4%, ADI 方式时 N2 处理的土壤过氧化氢酶活性提高 27.2%, FDI 方式时 N2 处理的

土壤过氧化氢酶活性提高 19.4%，均差异显著。

此外，不同处理相比，以 N2-ADI 处理的土壤过氧化氢酶活性最高。

2.2.2 脲酶活性 由表 3 可知，滴灌方式和施氮处理均对土壤脲酶活性的影响显著。其中，N2-ADI 处理的土壤脲酶活性较 N0-CDI 显著提高 33.3%。不同处理相比，以 N2-ADI 处理的土壤脲酶活性最高。

2.2.3 转化酶活性 由表 3 可知，施氮处理对土壤

转化酶活性的影响极显著，而滴灌方式对土壤转化酶活性的影响不显著。N2-ADI 处理的土壤转化酶活性较 N0-CDI 处理显著提高 54.4%。不同处理相比，以 N2-ADI 处理土壤转化酶活性最高。

2.3 土壤碳库和土壤酶活性的关系

由表 4 可知，土壤有机碳、活性有机碳含量和碳库管理指数与 3 种土壤酶活性之间的相关性均达 0.01 显著水平，说明土壤碳库的变化与土壤酶活性大小关系密切。

表 3 不同滴灌方式和施氮处理对土壤酶活性的影响¹⁾

Table 3 Effects of different drip irrigation methods and nitrogen treatments on enzyme activities in soil				
施氮处理 Nitrogen treatment (N)	滴灌方式 Drip irrigation method (DIM)	过氧化氢酶活性/ (mL·g ⁻¹) Catalase activity	脲酶活性/ (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹) Urease activity	转化酶活性/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹) Invertase activity
N0	CDI	1.45±0.04c	0.69±0.09bc	11.18±1.88bc
	ADI	1.58±0.03bc	0.73±0.03abc	11.88±0.80abc
	FDI	1.44±0.04c	0.61±0.02c	9.80±0.74c
N1	CDI	1.60±0.01bc	0.77±0.05abc	13.83±1.34abc
	ADI	1.74±0.12b	0.84±0.05ab	14.38±1.07ab
	FDI	1.57±0.06bc	0.70±0.04bc	12.91±0.25bc
N2	CDI	1.79±0.07b	0.82±0.01abc	16.03±1.79abc
	ADI	2.01±0.04a	0.92±0.01a	17.26±1.11a
	FDI	1.72±0.08b	0.77±0.04abc	14.43±1.07abc
N3	CDI	1.63±0.07bc	0.72±0.11abc	15.06±1.30abc
	ADI	1.74±0.03b	0.77±0.09abc	15.71±0.98abc
	FDI	1.62±0.03bc	0.71±0.10abc	13.48±1.21abc
N4	CDI	1.47±0.10c	0.67±0.06bc	13.41±1.69bc
	ADI	1.58±0.14bc	0.70±0.08bc	14.37±0.62bc
	FDI	1.43±0.04bc	0.63±0.06bc	13.21±1.33bc
P	N	<0.001	0.016	<0.001
	DIM	<0.001	0.043	0.054
	N×DIM	0.983	0.997	0.999

1) 表中数据为平均值±标准误, 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

1) The values in the table are mean ± standard error, and different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)

表 4 土壤碳库指标与土壤酶活性的相关性¹⁾

Table 4 Correlation between carbon pool index and enzyme activity in soil			
指标 Index	过氧化氢酶活性 Catalase activity	脲酶活性 Urease activity	转化酶活性 Invertase activity
土壤有机碳含量 Soil organic carbon content (SOC)	0.669**	0.595**	0.628**
活性有机碳含量 Labile organic carbon content (LOC)	0.755**	0.533**	0.651**
碳库管理指数 Carbon pool management index (I_{CPM})	0.750**	0.545**	0.620**

1) “***” 表示相关性达到 0.01 的显著水平, $r_{0.01}=0.372$ 1, $n=45$

1) “***” indicates significant correlation at $P<0.01$ level, $r_{0.01}=0.372$ 1, $n=45$

3 讨论与结论

3.1 施氮处理对土壤碳库的影响

土壤碳库的微小变化对整个大气的 CO₂ 浓度甚至全球的碳平衡产生重大影响, 在某种程度上甚至可以认为, 大气 CO₂ 浓度的高低取决于土壤碳库的变化^[18], 因此正向培育土壤碳库具有重大的现实意义。有研究表明, 适量施用无机氮肥较不施肥处理使土壤碳储量平均增加 21 t·hm⁻²^[19]。李亚杰^[20]发现, 滴灌条件下适量增施氮肥可以增加土壤 SOC 含量。李玲等^[21]研究表明, 6 年单施氮肥能明显提高坡旱地土壤有机碳含量, 比不施肥平均增加 14.8%, 因为施氮促进了作物生长并因此带来了更多的土壤碳输入^[22]。此外, Russell 等^[23]研究表明, 施用氮肥一方面可以促进土壤中作物残体的腐殖化作用, 以此来增加土壤有机碳含量, 另一方面也可以加速碳的矿化作用, 以减少土壤有机碳的含量。与以往研究结果相似, 本试验表明, 与不施氮处理 N0 相比, ADI 方式时 N1~N4 处理的 LOC 含量提高 18.6%~85.6%, 差异均显著, N1~N3 处理的 SOC 含量均显著提高, N4 处理有所提高, 但未达显著水平, 表明不同滴灌施氮量对土壤碳库有一定的影响。这可能是因为滴灌施氮影响了土壤微生物的活性与功能, 也有可能是不同滴灌施氮量对土壤碳的矿化程度不同, 改变了土壤中碳的循环与转化, 但其生物学机理还需要进一步研究。

3.2 滴灌方式对土壤碳库的影响

本研究表明, 与常规滴灌相比, 交替滴灌能显著提高土壤活性有机碳含量。以往研究也发现, 交替滴灌有利于土壤有机碳的积累^[24]和可溶性有机碳的活性^[25]。王金凤等^[26]研究发现, 由于交替灌溉使两侧根区土壤处于交替干燥和湿润状态, 在提供生命活动所需水分的同时, 使根区土壤处于良好的通气状态, 为土壤微生物提供了有益的生存条件, 与本研究结果相对应, 因此交替滴灌方式较常规滴灌和固定滴灌更有利于土壤碳的固持。

3.3 土壤碳库与酶活性的相关性

土壤酶活性是评价土壤肥力状况的重要指标^[27]。脲酶对土壤氮素循环的促进作用具有重要意义; 过氧化氢酶可以氧化对生物体 (包括土壤) 有危害的具有很强氧化作用的过氧化氢, 常用以表征土壤的氧化强度; 转化酶又称蔗糖酶, 对土壤中碳素转化以及土壤有机碳含量的变化均有重要的作用^[28-29]。有研究显示, 与常规滴灌相比, 交替滴灌在不同时期可提高其湿润区土壤转化酶、脲酶和过氧化氢酶活性^[30-31]。

张笑培等^[32]发现, 土壤有机碳含量与土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性呈极显著或显著相关。张静等^[33]在不同土地利用方式下赤红壤生物学性状及其与土壤肥力的关系研究中发现, 土壤有机碳含量与脲酶和转化酶活性均呈极显著正相关, 与本研究的结果相似。然而, 文月荣^[34]在不同植被恢复模式下煤矿排土场土壤碳库管理指数与土壤酶活性的研究结果显示, 土壤有机碳含量与脲酶活性之间关系不显著, 土壤有机碳含量与过氧化氢酶活性呈极显著的负相关关系, 与本试验结果有所不同。这可能是不同土壤类型下土壤酶活性不同, 或交替滴灌条件下 3 种土壤酶活性总体较高的缘故, 此外, 还可能是土壤有机碳库变化较为缓慢, 本研究前后时间相对较短造成的, 因此, 需要进一步研究。

3.4 结论

本试验条件下, 与 N0-CDI 相比, N2-ADI 处理土壤有机碳含量提高 55.2%, 活性有机碳含量提高 111.8%, 土壤碳库管理指数提高 90.5%。此外, 土壤有机碳含量、活性有机碳含量和碳库管理指数与土壤过氧化氢酶、脲酶、转化酶活性之间的关系显著。因此, 滴灌施氮量 0.18 g·kg⁻¹ 结合交替滴灌处理是赤红壤碳库管理的最佳滴灌施氮模式。

参考文献:

[1] SOON Y K, ARSHAD M A, HAQ A, et al. The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil[J]. Soil Till Res, 2007, 95(1): 38-46.

[2] LEFROY R D B, BLAIR G, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. Plant Soil, 1993, 155/156(1): 399-402.

[3] 宇万太, 马强, 赵鑫, 等. 不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2013-2016.

[4] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2147-2156.

[5] 岳会锦, 陶瑞, 褚贵新. 滴灌棉田有机碳组分对不同比率有机无机肥配施的响应[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(9): 1630-1637.

[6] 俞华林, 张恩和, 王琦, 等. 灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田土壤有机碳、全氮和籽粒产量的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 227-233.

[7] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 544-550.

[8] 唐首锋, 张玉龙, 袁德玲, 等. 保护地不同灌溉方式下土壤碳库管理指数的研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 39-41.

- [9] 万忠梅, 宋长春, 杨桂生, 等. 三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 406-412.
- [10] 谭宏伟. 广西赤红壤区的资源优势、问题与科工农贸综合开发[J]. *南方农业学报*, 2003(S2): 22-24.
- [11] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 713-726.
- [12] 邓兰生, 王亮, 涂攀峰, 等. 滴灌施氮对赤红壤酸化的影响[J]. *热带作物学报*, 2009, 30(9): 1295-1300.
- [13] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 459-465.
- [14] 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.
- [15] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Aust J Agric Res*, 1995, 46(7): 393-406.
- [16] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723-729.
- [17] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 黄涛. 长期碳氮投入对土壤有机碳氮库及环境影响的机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [19] DERSCH G, BÖHM K. Effects of agronomic practices on the soil carbon storage potential in arable farming in Austria[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2001, 60(1/2/3): 49-55.
- [20] 李亚杰. 水氮耦合对复播大豆产量形成及土壤固碳效应的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [21] 李玲, 朱捍华, 苏以荣, 等. 稻草还田和易地还土对红壤丘陵农田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 926-933.
- [22] TONG C L, XIAO H, TANG G Y, et al. Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China[J]. *Soil Till Res*, 2009, 106(1): 8-14.
- [23] RUSSELL A E, CAMBARDELLA C A, LAIRD D A, et al. Nitrogen fertilizer effects on soil carbon balances in Midwestern U.S. agricultural systems[J]. *Ecol Appl*, 2009, 19(5): 1102-1113.
- [24] 刘水. 分根区交替灌溉对土壤微生物量 C、N 和酶活性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [25] LUNDQUIST E J, JACKSON L E, SCOW K M. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31(7): 1031-1038.
- [26] 王金凤, 康绍忠, 张富仓, 等. 控制性根系分区交替灌溉对玉米根区土壤微生物及作物生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(10): 2056-2062.
- [27] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [28] 杨万勤, 王开运. 土壤酶研究动态与展望[J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(5): 564-570.
- [29] 张咏梅, 周国逸, 吴宁. 土壤酶学的研究进展[J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, 1(1): 83-90.
- [30] 梁海玲. 根区局部灌溉水肥一体化对糯玉米生长和水养分利用的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [31] 余江敏, 李伏生, 农梦玲. 根区局部灌溉和有机无机氮比例对种植玉米土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 334-340.
- [32] 张笑培, 杨改河, 任广鑫, 等. 黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(6): 64-68.
- [33] 张静, 高云华, 张池, 等. 不同土地利用方式下赤红壤生物学性状及其与土壤肥力的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3423-3430.
- [34] 文月荣. 不同植被恢复模式下煤矿排土场土壤碳库管理指数与土壤酶活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

【责任编辑 李晓卉】