

不同促腐条件下秸秆还田对土壤微生物量碳氮磷动态变化的影响^{*}

张电学^{1,3**} 韩志卿¹ 李东坡^{2,3} 刘微¹ 高书国¹ 侯东军¹ 常连生¹

(¹河北科技师范学院农学系, 昌黎 066600; ²中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ³沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161)

【摘要】 通过2年田间定位试验,研究了冀东地区小麦-玉米轮作制度下,不同促腐条件下玉米秸秆配施化肥直接还田对土壤微生物量C、N、P动态变化的影响,并讨论了其与土壤养分和酶活性的关系。结果表明,秸秆配施化肥并调节其C/N条件下,施用促腐剂处理作物各生育期土壤微生物量C、N、P均表现出高于未施用处理的趋势,并使微生物量N、P达到高峰期的时间提前,对土壤养分调控效果较好。土壤微生物量C、N、P与土壤酶活性在作物各生育期均表现为显著和极显著正相关关系,但与土壤碱解氮、有效磷的相关性受到施肥制度和作物生长的强烈影响。

关键词 褐土 秸秆还田 促腐条件 微生物量 动态变化

文章编号 1001-9332(2005)10-1903-06 **中图分类号** S154.3 **文献标识码** A

Effects of returning maize straw into field on dynamic change of soil microbial biomass C, N and P under different promoted decay condition. ZHANG Dianxue^{1,3}, HAN Zhiqing¹, LI Dongpo^{2,3}, LIU Wei¹, GAO Shuguo¹, HOU Dongjun¹, CHANG Liansheng¹ (¹Department of Agronomy, Hebei Normal University of Science and Technology, Changli 066600, China; ²Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China; ³Soil and Environmental College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(10):1903~1908.

A 2-year field experiment of wheat-maize rotation was conducted on a cinnamon soil of east Hebei Province to study the effects of returning maize straw into field on the dynamics of soil microbial biomass C, N and P, and their relationships with soil nutrients and enzyme activities. The results showed that under the condition of returning maize straw combined with applying chemical fertilizer to adjust straw C/N, the application of effective microorganisms could increase soil microbial biomass C, N and P in each crop growth period, advance their peak time, and better regulate soil nutrient supply, compared with no application of effective microorganisms. Soil microbial biomass had a significantly positive correlation with soil enzyme activities, but its correlation with soil hydrolysable N and available P was strongly affected by crop growth and fertilization system.

Key words Cinnamon soil, Returning straw into field, Promoted decay condition, Microbial biomass, Dynamic change.

1 引 言

众所周知,秸秆直接还田后腐解过程主要是在土壤微生物作用下的生物化学过程。在对秸秆进行腐解的同时,土壤微生物利用秸秆中的碳源物质大量进行自身繁殖,将秸秆中的碳同化为微生物体碳,同时从土壤中吸取部分氮、磷等养分作为自身机体的组成部分,将土壤氮、磷养分同化为微生物体氮、磷^[13,20,29]。研究表明,土壤微生物量N的周转速率一般较土壤有机氮快5倍^[22],土壤微生物量P的年周转量至少是微生物量P的2倍^[4,6],微生物量N、P在调控土壤氮、磷对植物有效性和生态循环方面有重要意义^[26,30]。因此,土壤微生物量在土壤物质和能量转换中起着极为重要的作用,它不仅能代表

参与调控土壤中能量和养分循环以及有机质转化的对应微生物数量,而且能够反映出人为因素或其它干扰引起的土壤性质变化,对土壤环境的改变极为敏感^[3,11,15,16,18,24,27,33]。秸秆直接还田是向土壤加入大量新鲜有机碳源的过程,土壤微生物量碳、氮、磷必然对不同还田控制条件做出响应,而考察这些响应对评价秸秆直接还田技术措施的效应显然具有重要意义。本试验采用田间试验,对冀东地区小麦-玉米一年二熟种植制度下,玉米秸秆调节不同C/N和配施促腐剂直接还田后土壤微生物量C、N、P的

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(1999011808-04)、中国科学院沈阳应用生态研究所知识创新工程重大项目(SCXZD0104-02)和河北省教育厅资助项目(990208)。

^{**} 通讯联系人。

2004-11-15收稿,2005-03-28接受。

动态变化进行了研究, 以期科学进行秸秆直接还田提高作物产量提供理论依据和实施办法。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验于1999年9月至2001年9月在河北科技师范学院农场进行。供试作物为小麦-玉米轮作, 小麦品种为京冬8号, 玉米品种为唐抗5号, 共种植四季作物。供试土壤为中壤质潮褐土, 土壤基本理化性状为: 有机质 $15.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, 微生物量 C $663.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, 微生物量 N $71.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, 微生物量 P $32.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, 碱解氮 $86.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, 有效磷 $15.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, 速效钾 $68.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, pH6.7。供试玉米秸秆于成熟期采自河北科技师范学院农场, 含有机碳 $436.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重, 氮 $9.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重, 磷 (P_2O_5) $3.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重, 钾 (K_2O) $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重, C/N 47.9, C/P 322.1。

2.2 试验设计

田间试验设6个处理, 3次重复。区组随机排列, 小区面积 $4 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$, 各处理为: (1) NPK(CK), (2) $\text{N}_1\text{PK} + \text{C}$, (3) $\text{N}_2\text{PK} + \text{C}$, (4) $\text{N}_3\text{PK} + \text{C}$, (5) $\text{N}_2\text{PK} + \text{C} + \text{PD}$, (6) $\text{N}_3\text{PK} + \text{C} + \text{PD}$ 。

小麦基础化肥用量(CK): N $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。供试化肥氮肥为尿素和磷酸二铵, 磷肥为磷酸二铵, 以磷定氮后氮素不足部分施用尿素, 钾肥为氯化钾。各加秸秆处理 P、K 肥用量和 CK 相同, 氮肥用量在 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 基础上, 加施氮肥(尿素)分别调节 C/N 为 15:1、25:1 和 35:1。试验设计中 N_1 、 N_2 、 N_3 表示各处理氮肥不同用量, 促腐剂为本课题组研制的生物制剂, 主要成分是 *Streptomyces microflavus*、*Aspergillus niger* 等微生物和食用菌菌糠, 未添加养分。秸秆用量 $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (风干重)。玉米只施用基础化肥, 施用量为 N $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 各处理施肥量相同。

秸秆采用切短后施用, 长度 3~4 cm, 小麦播种前均匀撒施于地表, 将调节秸秆 C/N 所用氮肥及促腐剂布撒于秸秆之上后耕翻, 然后将化肥基肥(基础氮肥用量的 1/3 及全部磷、钾肥)撒于地表后旋耕, 播种, 基础氮肥用量的 2/3 用作追肥, 分别于冬前和返青后追施。玉米全部磷、钾肥及 1/2 氮肥作基肥施入, 1/2 氮肥作为追肥在大喇叭口期追施。作物生长期常规管理, 作物产量各小区单收单打。

2.3 分析方法

于小麦各主要生育期及玉米收获前采集各处理表层(0~20 cm)的土壤样品, 然后室内风干、过 1 mm 筛备用, 分别测定各时期土壤微生物量 C、N、P、酶活性及碱解氮、有效磷含量。各采样时期为: 试前(1999年9月28日, 播种前采集)、冬前(1999年11月13日、2000年11月18日)、起身期

(2000年3月17日、2001年3月20日)、拔节期(2000年4月16日、2001年4月17日)、开花期(2000年5月19日、2001年5月20日)、小麦收获期(2000年6月20日、2001年6月19日)、玉米收获期(2000年9月26日、2001年9月28日)。

土壤微生物量 C、N、P 采用氯仿熏蒸直接提取法^[1,23], 将土壤含水量调至田间最大持水量的 45%, 在 25 °C 下预培养 7 d。土壤微生物量 C、N 用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{K}_2\text{SO}_4$ 提取(土:水-1:4), 提取液中 C 测定用重铬酸钾-硫酸消煮, 硫酸亚铁滴定法; N 测定用半微量凯氏法, 土壤微生物量 C、N 含量以熏蒸和未熏蒸土样 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{K}_2\text{SO}_4$ 提取液中 C、N 含量之差乘以系数得到, $B_c = 2.64E_c$, $B_N = E_N/0.54$, 其中 E_c 和 E_N 为熏蒸土样与未熏蒸土样提取液 C、N 含量之差。土壤微生物量 P 采用氯仿熏蒸, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 提取(土:水-1:4), 提取液中 P 的测定用钼锑抗比色法, $B_p = E_p/0.4$, 式中 E_p 为熏蒸土样提取液中的 P 与未熏蒸土样提取液中的 P 之差。

酶活性测定, 过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法(20 °C, 20 min)^[32]。转化酶采用硫代硫酸钠滴定法(37 °C, 24 h)^[32]。脲酶采用生成铵比色法(37 °C, 24 h)^[32]。中性磷酸酶采用苯磷酸二钠比色法(37 °C, 12 h)^[31]。土壤及植物养分均采用土壤农化常规方法测定^[12]。

3 结果与分析

3.1 对作物各生育期土壤微生物量碳、氮、磷含量的影响

从表 1 可以看出, 试验 2 年间各处理土壤微生物量 C、N、P 的变化趋势大致相同, 以第一年数据进行讨论(下同)。在小麦各生育期和玉米收获期, 不同处理之间比较, 秸秆还田各处理微生物量 C、N、P 含量均显著高于 NPK 处理, 说明大量新鲜碳源的施入刺激了微生物的增殖; 在还田处理中, $\text{N}_1\text{PK} + \text{C}$ 、 $\text{N}_2\text{PK} + \text{C}$ 和 $\text{N}_3\text{PK} + \text{C}$ 3 个处理各时期土壤微生物量 C、N、P 含量均无显著差异, $\text{N}_2\text{PK} + \text{C} + \text{PD}$ 和 $\text{N}_3\text{PK} + \text{C} + \text{PD}$ 2 个处理各时期土壤微生物量 C、N、P 含量差异亦均未达显著水平; 除小麦收获期外, $\text{N}_2\text{PK} + \text{C} + \text{PD}$ 和 $\text{N}_3\text{PK} + \text{C} + \text{PD}$ 处理微生物量 C 在作物各生育期均表现为显著高于 $\text{N}_1\text{PK} + \text{C}$ 、 $\text{N}_2\text{PK} + \text{C}$ 和 $\text{N}_3\text{PK} + \text{C}$ 处理, 小麦收获期则表现出前者高于后者的趋势; 土壤微生物量 N、P 含量, 则表现为在小麦生长的冬前、起身和拔节期, $\text{N}_2\text{PK} + \text{C} + \text{PD}$ 和 $\text{N}_3\text{PK} + \text{C} + \text{PD}$ 处理均显著高于 $\text{N}_1\text{PK} + \text{C}$ 、 $\text{N}_2\text{PK} + \text{C}$ 和 $\text{N}_3\text{PK} + \text{C}$ 处理, 小麦开花、收获和玉米收获期亦表现出高于后者的趋势, 说明秋施玉米秸秆直接还田, 在施用足量 NPK 化肥条件下, 调节

表 1 各处理土壤微生物量碳、氮、磷变化动态

Table 1 Dynamics of soil microbial biomass C, N and P under different treatments(mg·kg⁻¹ dry soil)

处理 Treatments	1999~2000 年						2000~2001 年					
	冬前 Before winter	起身 Starting	拔节 Jointing	开花 Blooming	小麦收获 Wheat harvest	玉米收获 Maize harvest	冬前 Before winter	起身 Starting	拔节 Jointing	开花 Blooming	小麦收获 Wheat harvest	玉米收获 Maize harvest
微生物量碳 Microbial biomass C												
NPK	685.7 ^c	760.0 ^c	836.2 ^c	897.1 ^c	760.5 ^b	667.8 ^c	691.4 ^c	753.2 ^c	844.7 ^c	883.9 ^c	751.3 ^b	674.2 ^c
N ₁ PK + C	902.9 ^b	1 015.1 ^b	1 138.7 ^b	1 293.2 ^b	1 252.6 ^a	865.2 ^b	1 037.1 ^b	1 124.3 ^b	1 236.5 ^b	1 367.8 ^b	1 325.7 ^a	927.3 ^b
N ₂ PK + C	918.6 ^b	1 007.7 ^b	1 169.4 ^b	1 321.5 ^b	1 263.9 ^a	892.0 ^b	1 008.3 ^b	1 136.2 ^b	1 227.8 ^b	1 354.1 ^b	1 321.9 ^a	928.6 ^b
N ₃ PK + C	898.6 ^b	1 012.9 ^b	1 139.5 ^b	1 307.1 ^b	1 250.9 ^a	867.1 ^b	1 015.3 ^b	1 115.5 ^b	1 243.9 ^b	1 348.6 ^b	1 324.3 ^a	943.4 ^b
N ₂ PK + C + PD	1 085.7 ^a	1 341.9 ^a	1 508.1 ^a	1 557.9 ^a	1 406.8 ^a	1 059.6 ^a	1 192.5 ^a	1 458.7 ^a	1 593.4 ^a	1 632.7 ^a	1 487.6 ^a	1 124.3 ^a
N ₃ PK + C + PD	1 071.3 ^a	1 340.3 ^a	1 472.0 ^a	1 551.5 ^a	1 395.2 ^a	1 038.2 ^a	1 204.6 ^a	1 431.3 ^a	1 567.1 ^a	1 614.3 ^a	1 463.5 ^a	1 108.1 ^a
微生物量氮 Microbial biomass N												
NPK	76.9 ^c	80.8 ^c	82.9 ^c	87.6 ^b	72.4 ^b	70.3 ^d	75.4 ^b	81.1 ^c	84.2 ^c	89.5 ^b	74.7 ^b	71.6 ^c
N ₁ PK + C	107.3 ^{ab}	116.0 ^b	121.9 ^b	130.5 ^a	121.2 ^a	95.3 ^{bc}	123.0 ^a	129.4 ^b	132.0 ^b	137.1 ^a	127.3 ^a	101.5 ^b
N ₂ PK + C	106.0 ^b	117.3 ^b	124.2 ^b	135.6 ^a	119.5 ^a	94.8 ^{bc}	118.5 ^a	131.5 ^b	130.5 ^b	139.2 ^a	126.6 ^a	99.1 ^b
N ₃ PK + C	105.1 ^b	116.9 ^b	120.0 ^b	132.9 ^a	119.2 ^a	90.4 ^c	119.9 ^a	130.6 ^b	132.2 ^b	139.2 ^a	127.1 ^a	99.4 ^b
N ₂ PK + C + PD	121.8 ^a	142.4 ^a	152.1 ^a	144.8 ^a	128.8 ^a	111.5 ^a	134.4 ^a	156.7 ^a	162.9 ^a	155.3 ^a	138.1 ^a	119.2 ^a
N ₃ PK + C + PD	122.4 ^a	136.3 ^a	149.6 ^a	142.1 ^a	126.9 ^a	108.4 ^{ab}	135.2 ^a	154.6 ^a	160.1 ^a	154.8 ^a	136.6 ^a	117.8 ^a
微生物量磷 Microbial biomass P												
NPK	42.7 ^c	40.3 ^c	38.5 ^c	36.1 ^d	32.8 ^b	31.4 ^b	42.7 ^c	39.8 ^c	39.2 ^c	35.8 ^c	32.5 ^b	31.9 ^b
N ₁ PK + C	66.4 ^b	71.5 ^b	75.4 ^b	69.2 ^{abc}	61.7 ^a	58.8 ^a	75.7 ^b	79.7 ^b	81.3 ^b	73.1 ^{ab}	65.6 ^a	63.5 ^a
N ₂ PK + C	67.5 ^b	72.5 ^b	75.9 ^b	68.5 ^{bc}	62.0 ^a	60.1 ^a	74.1 ^b	81.2 ^b	83.5 ^b	73.2 ^{ab}	65.1 ^a	64.0 ^a
N ₃ PK + C	65.8 ^b	72.9 ^b	74.1 ^b	67.4 ^c	60.5 ^a	59.1 ^a	74.7 ^b	79.1 ^b	81.3 ^b	71.3 ^b	64.9 ^a	62.6 ^a
N ₂ PK + C + PD	82.3 ^a	98.7 ^a	96.1 ^a	78.7 ^{ab}	68.6 ^a	65.8 ^a	91.7 ^a	108.9 ^a	104.1 ^a	83.7 ^a	74.0 ^a	71.2 ^a
N ₃ PK + C + PD	81.8 ^a	99.3 ^a	93.2 ^a	79.3 ^a	68.1 ^a	66.2 ^a	92.0 ^a	106.8 ^a	101.1 ^a	81.9 ^a	72.1 ^a	70.1 ^a

L. S. R 5% 差异显著性 Different letter means significant at 5% level.

秸秆不同 C/N 对土壤微生物量 C、N、P 的影响没有差异,而在调节秸秆 C/N 基础上施用促腐剂则提高土壤微生物量 C、N、P 含量,施用促腐剂有助于增强土壤微生物活性,促进土壤内部物质和能量的运转。

3.2 对土壤微生物量碳、氮、磷动态变化的影响

从表 1 可以看出,在小麦生育期内,各处理土壤微生物量 C 的动态变化趋势大体一致,但也有差异.相同之处是各处理土壤微生物量 C 均表现为自播种-开花期逐渐上升,并于开花期达到最高点,至小麦收获期有所下降;区别则在于各处理土壤微生物量 C 增加和减少过程中峰值出现的时期不同.NPK 处理自播种-冬前增加量较小,说明仅靠作物残留根茬还田为微生物提供的易利用 C 源是不够的;其后一直至开花期,该处理各生育期间微生物量 C 含量有较大幅度上升.起身期微生物量 C 的增加显然与此期气温上升、作物根系活动趋于活跃及冬季严寒造成的局部灭菌使部分死亡的微生物 C 开始释放以供微生物利用有关^[14];而随着小麦生育期的递进,土壤水热状况更适于微生物活动及作物生长过程中根系分泌物的增多,微生物所需能源增加,生命活动活跃,微生物量 C 出现上升^[28];小麦开花期-收获期微生物量 C 下降,则和作物成熟后根系活动减弱、分泌物减少有关^[7].在还田处理中,小麦生育期内土壤微生物量 C 的跃升峰值动态变化趋势则可明显分为 2 种类型:N₁PK + C、N₂PK + C 和 N₃PK + C 处理趋势一致,N₂PK + C + PD 和 N₃PK

+ C + PD 处理趋势相同.其中,各还田处理微生物量 C 增加的第一个跃升高峰期均出现在播种期-冬前期,从生育期之间微生物量 C 的增加量来看,这一时期各处理土壤微生物量 C 的增加幅度都是最大的,表明在秸秆直接还田的起始阶段,易于分解的小分子有机物质首先被微生物大量的同化利用^[17,21],微生物量 C 迅速增加;不同处理之间比较,本期微生物量 C 的增加幅度表现为 N₂PK + C + PD 和 N₃PK + C + PD 处理大于 N₁PK + C、N₂PK + C 和 N₃PK + C 处理.第二跃升高峰期各处理出现的时间不同,N₂PK + C + PD 和 N₃PK + C + PD 处理出现于冬前-起身期,之后 2 个时期增加量逐渐减小,但与前两个时期一样,其起身期-拔节期增加量仍高于同期 N₁PK + C、N₂PK + C 和 N₃PK + C 处理的增加量;N₁PK + C、N₂PK + C 和 N₃PK + C 处理冬前-起身期和起身期-拔节期微生物量 C 的增加较为平缓,于拔节-开花期出现第二次跃升高峰,此期其微生物量 C 增加量超过了 N₂PK + C + PD 和 N₃PK + C + PD 处理同期增加量,且其开花期-收获期微生物量 C 的下降幅度亦小于后者同期下降量,说明它们在开花期-收获期微生物仍有较大增殖,这也是小麦成熟期秸秆还田各处理间微生物量 C 含量差异未达显著水平的原因之一.微生物量 C 的动态变化实际上是土壤微生物种群、数量及其活性动态变化的反应,也是秸秆转化速率和程度的指征^[3,9].前述不同促腐条件下土壤微生物量 C 的动态变化表明,施用

促腐剂促进了秸秆的快速腐解,加快了其转化进程,使秸秆的转化在小麦需养量较少的生育前期(播种-拔节期)大致完成,这对缓解秸秆腐解过程中微生物增殖与作物争夺养分的矛盾具有重要意义。

小麦-玉米轮作周期内,各处理微生物量 N 的动态变化趋势亦有差异。从表 1 可以看出, NPK、 $N_1PK + C$ 、 $N_2PK + C$ 和 $N_3PK + C$ 处理变化趋势一致,且与其各自微生物量 C 动态变化过程相同;而 $N_2PK + C + PD$ 和 $N_3PK + C + PD$ 处理微生物量 N 动态变化趋势与其它处理不同,表现为自播种-拔节期一直上升,并于拔节期达到最大值后开始下降,其微生物量 N 达到最高峰的生育期较 $N_1PK + C$ 、 $N_2PK + C$ 和 $N_3PK + C$ 处理提前了一个时期;此外,在其微生物量 N 上升过程中,各时期的增加量均高于前者同时期的增加量,显示出在这些时期其微生物活动更为活跃。土壤微生物量 N 达到最高值后下降,意味着微生物在分解秸秆过程中对氮素的净固持阶段结束,转入氮素的净释放阶段^[10]。不同处理之间微生物量氮的动态变化表明施用促腐剂使微生物对氮素大量固定时期和由净固持转向净释放时间均提前。在土壤氮素供应充分(基肥和 2 次追肥)且作物需养量相对较少的时期,土壤微生物量 N 的增加意味着微生物对氮素的保护,可有效防止氮素的损失;而拔节期后,作物需养量开始迅速增加,这 2 个处理的微生物体 N 开始释放出来供作物吸收利用,这对调节土壤氮素供应、提高肥料利用率具有重要意义^[2,8]。

小麦-玉米轮作周期内,各处理微生物量 P 的动态变化趋势差异明显。从表 1 可以看出,小麦生育期内, NPK 处理表现为播种-冬前上升,于冬前达到全生育期最高峰,之后一直缓慢下降,这与化学磷肥作基肥有关^[5,25];秸秆还田处理中, $N_1PK + C$ 、 $N_2PK + C$ 和 $N_3PK + C$ 处理表现为自播种-拔节期一直上升,于拔节期达到全生育期最高点后逐渐降低; $N_2PK + C + PD$ 和 $N_3PK + C + PD$ 处理则表现为自播种-起身期增加,于起身期达到最高点后下降,其达到最高点的时期早于前者;此外,与微生物量 N 一样,在其微生物量 P 上升过程中,这 2 个处理各时期的增加量均高于前者同时期的增加量。与氮素不同,秸秆中的磷有 50%~70% 为水溶性磷^[19],这部分磷素在秸秆还田后会很快释放出来,因而秸秆直接还田后的磷素转化一般表现为释放-微生物固持-释放过程。本试验土壤微生物量 P 的动态变化表

明,施用促腐剂使微生物对磷素的净固持阶段于小麦起身期达到高峰,之后开始进入再次净释放阶段,早于未施用处理,后者于小麦拔节期达到此阶段。从小麦对磷素吸收特点来看,磷素供应对其全生育期特别是生育早期(苗期、冬前分蘖期、返青期)十分重要,但在植株发育较小的情况下,其需要虽然紧迫但绝对量并非很大,化学磷肥作为基肥的施入及秸秆中水溶性磷的释放,为作物生长提供了大量磷源,而由于外源磷素进入土壤后极易被固定,在作物对磷素需要绝对量并非很大的情况下,微生物于此期大量繁殖并固定部分有效性磷,然后于作物生长旺盛、需养绝对量增加的中后期释放,对提高磷肥利用率、减少化学磷肥的化学固定具有重要意义。

自小麦收获期至玉米收获期,各处理微生物量 C、N、P 含量均有所下降, NPK 处理降至试前水平,各还田处理则较试前有明显提高。与小麦收获期相比,秸秆还田处理的下降幅度较大,显然与秸秆的转化进程有关,表明玉米秸秆经一年腐解后,其对微生物的影响已趋于稳定,同时玉米收获期水热状况较小麦收获期差,这是土壤微生物量 C、N、P 下降的原因^[19]。

3.3 土壤微生物量碳、氮、磷与土壤酶活性、有效养分及作物产量之间的关系

小麦、玉米收获期土壤微生物量 C、N、P 与土壤酶活性、碱解氮、有效磷含量及小麦、玉米产量间均呈显著或极显著的正相关关系(表 2),在小麦的其它生育期,土壤微生物量 C、N、P 与土壤 4 种酶活性间亦均呈显著或极显著正相关关系(表略),二者具有较好的同步性。

在小麦的其它生育期,土壤微生物量 C、N、P 与土壤碱解氮和有效磷之间的关系则较为复杂(表略),小麦冬前测定结果,微生物量 C、N、P 与碱解氮和有效磷之间均无相关关系,而在起身期则出现负相关趋势,但未达显著水平;在拔节期,土壤微生物量 C、N、P 与碱解氮之间呈现出显著和极显著负相关关系,与有效磷呈正相关趋势但未达显著水平。考察这几个时期可以发现,由于化学肥料施用、秸秆还田后的转化及作物生长等因素的影响,这些时期土壤内部物质和能量的运转过程极为复杂,土壤碱解氮、有效磷含量实际上受到包括施肥(特别是速效性化学肥料的施用)、作物吸收、微生物分解秸秆期间的固定与释放、秸秆中含氮、磷有机化合物的分解释放、土壤对氮、磷的物理及化学固定以及氮素的挥发淋溶损失等各种因素的影响,此时微生物量 C、N、P

表 2 土壤微生物量与酶活性、养分和作物产量间的相关性

Table 2 Relationship among microbial biomass and enzyme activities and soil nutrient and crop yield

时间 Time	项目 Item	碱解氮 Alk-hydro. N	有效磷 Avail. P	过氧化氢酶 Catalase	转化酶 Invertase	脲酶 Urease	磷酸酶 Phosphatase	小麦产量 Wheat yield	玉米产量 Corn yield
小麦收获期 Wheat harvest	微生物量碳 Microbial biomass C	0.874*	0.942**	0.997**	0.994**	0.996**	0.894*	0.937**	0.919**
	微生物量氮 Microbial biomass N	0.814*	0.908*	0.998**	0.999**	0.998**	0.840*	0.902*	0.874*
	微生物量磷 Microbial biomass P	0.853*	0.935**	0.999**	0.998**	0.999**	0.876*	0.924**	0.905*
玉米收获期 Maize harvest	微生物量碳 Microbial biomass C	0.964**	0.951**	0.938**	0.892*	0.891*	0.947**	0.981**	0.990**
	微生物量氮 Microbial biomass N	0.938**	0.948**	0.948**	0.912*	0.909*	0.963**	0.989**	0.994**
	微生物量磷 Microbial biomass P	0.928**	0.861*	0.998**	0.997**	0.996**	0.954**	0.916*	0.898*

n=6, $r_{0.01}=0.811$, $r_{0.05}=0.917$. 1999~2000年数据 The data is from 1999 to 2000.

与土壤有效养分之间的关系就成为这一系列复杂关系中的一部分,它们之间的关系就很难再用简单相关来描述,在这样的时期以土壤微生物量C、N、P来表征土壤不同状态养分间的转化强度而非有效性养分的数量可能更为适宜.因而考察它们之间的数量关系时,对于受到人为措施重大影响的农田土壤,在较少受到影响的收获期较为稳妥.

4 结 论

4.1 不同促腐条件下,玉米秸秆配施化肥直接还田均可明显提高作物各生育期内土壤微生物量C、N、P含量.在施用足量NPK化肥的基础上,调节秸秆不同C/N对土壤微生物量C、N、P动态及含量的影响没有差异;在调节秸秆C/N的基础上施用促腐剂,则使秸秆转化过程中微生物量C的第二跃升高峰期以及微生物量N、P达到最高峰的时间提前,并使土壤微生物量C、N、P在作物各生育期均表现出高于未施用处理的趋势,施用促腐剂利于玉米秸秆的快速腐解和土壤有效养分的调控,从而有助于作物生长发育和产量形成.

4.2 小麦、玉米收获期土壤微生物量C、N、P与同期土壤酶活性、碱解氮、有效磷含量及作物产量均呈显著或极显著正相关关系.在小麦的其它生育期,土壤微生物量C、N、P与土壤4种酶活性间亦均呈显著或极显著正相关关系,二者具有较好的同步性;而由于施肥和秸秆还田及作物生长造成的综合影响,土壤微生物量C、N、P与土壤碱解氮、有效磷的关系在这些时期较为复杂,对于受到人为措施重大影响的农田土壤,在这样的时期以土壤微生物量来表征土壤不同状态养分间的转化强度而非有效性养分的数量更为适宜.

参考文献

- Brookes PC, Powlson DS, Jenkinson DS. 1984. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biol Biochem*, 16: 169~175
- Fan J(樊 军), Hao M-D(郝明德). 2003. Effects of long-term rotations and fertilizations on soil microbial biomass carbon and nitrogen. *Res Soil Water Cons(水土保持研究)*, 10(1): 85~87(in Chinese)

- nese)
- He Z-L(何振立). 1997. Soil microbial biomass and the significance of its nutrient circulation and environmental quality estimations. *Soils(土壤)*, (2): 61~69(in Chinese)
- Huang M(黄 敏), Wu J-S(吴金水), Huang Q-Y(黄巧云), et al. 2003. Process in research on microbiological action of soil phosphorus. *Ecol Environ(生态环境)*, 12(3): 366~370(in Chinese)
- Kandeler E, Palli S, Stemmer M, et al. 1999. Tillage changes microbial biomass and enzyme activities in particle-size fractions of a haplic chorzema. *Soil Biol Biochem*, 31: 1253~1264
- Li D-P(李东坡), Wu Z-J(武志杰), Chen L-J(陈利军), et al. 2004. Dynamics of microbial biomass P and its affecting factors in a long-term fertilized black soil. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 15(10): 1897~1902(in Chinese)
- Li D-P(李东坡), Wu Z-J(武志杰), Chen L-J(陈利军), et al. 2004. Dynamics of microbial biomass C in a black soil under long-term fertilization and related affecting factors. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 15(8): 1334~1338(in Chinese)
- Li D-P(李东坡), Chen L-J(陈利军), Wu Z-J(武志杰), et al. 2004. Dynamics of microbial biomass N in different fertilized black soil and its related factors. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 15(10): 1891~1896(in Chinese)
- Li G-T(李贵桐), Zhang B-G(张宝贵), Li B-G(李保国). 2003. Effect of straw pretreatment on soil microbial biomass and respiration activity. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 14(12): 2225~2228(in Chinese)
- Li G-T(李贵桐), Zhao Z-J(赵紫娟), Huang Y-F(黄元仿), et al. 2002. Effect of straw returning on soil nitrogen transformation. *Plant Nutr Fert Sci(植物营养与肥料学报)*, 8(2): 162~167(in Chinese)
- Li S-Q(李世清), Ren S-J(任书杰), Li S-X(李生秀). 2004. Seasonal change of soil microbial biomass and the relationship between soil microbial biomass and soil moisture and temperature. *Plant Nutr Fert Sci(植物营养与肥料学报)*, 10(1): 18~23(in Chinese)
- Li Y-K(李酉开). 1984. *Soil Agrochemical Routine Analytical Method*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Liang W(梁 巍), Yue J(岳 进), Wu J(吴 劼), et al. 2003. Seasonal variations of soil microbial biomass respiration rate and CH₄ emission in black earth rice fields. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 14(12): 2278~2280(in Chinese)
- Liu M-Q(刘满强), Hu F(胡 锋), He Y-Q(何园球), et al. 2003. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under different vegetations restored on degraded red soils. *Acta Pedol Sin(土壤学报)*, 40(6): 937~944(in Chinese)
- Ocio JA, Brookes PC. 1990. An evaluation of methods for measuring the microbial biomass in soils following recent additions of wheat straw and the characterization of the biomass that develops. *Soil Biol Biochem*, 22: 685~694
- Pankhurst CE. 1997. Defining and Assessing Soil Health and Sustainable Productivity Biological Indicators of Soil Health. New York: CAB International. 1~324
- Qiang X-C(强学彩), Yuan H-L(袁红莉), Gao W-S(高旺盛). 2004. Effect of crop-residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 15(3): 469~472(in Chinese)

- 18 Ren T-Z(任天志). 2000. Soil bioindicators sustainable agriculture. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), **33**(1):68~75(in Chinese)
- 19 Shi Z-Y(时正元). 1993. Study of nutrient recycling in farm land. I. Use efficiency of nutrient in crop straw. *Soils* (土壤), **(6)**:281~285(in Chinese)
- 20 Song Q-H(宋秋华), Li F-M(李凤民), Liu H-S(刘洪升), et al. 2003. Effect of plastic film mulching on soil microbial biomass in spring wheat field in semi-arid loess area. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(9):1512~1516(in Chinese)
- 21 Song R(宋日), Wu C-S(吴春胜), Mou J-M(牟金明), et al. 2002. Effects of maize stubble remaining in field on dynamics of soil microbial biomass C and soil enzyme activities. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **13**(3):303~306(in Chinese)
- 22 Tang Y-X(唐玉霞), Jia S-L(贾树龙), Meng C-X(孟春香), et al. 2002. A summary of soil microbial biomass nitrogen. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), **10**(2):76~78(in Chinese)
- 23 Vance ED, et al. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol Biochem*, **19**:703~707
- 24 Wang J(王晶), Xie H-T(解宏图), Zhu P(朱平), et al. 2003. Cannotation and modern analysis method for active soil organic matter(carbon). *Chin J Ecol* (生态学杂志), **22**(6):109~112(in Chinese)
- 25 Wang J-H(王继红), Liu J-S(刘景双), Yu J-B(于君宝), et al. 2004. Effect of fertilizing N and P on soil microbial biomass carbon and nitrogen of black soil corn agroecosystem. *J Soil Water Cons* (水土保持学报), **18**(1):35~38(in Chinese)
- 26 Wang S-P(王淑平), Zhou G-S(周广胜), Sun C-Z(孙长占), et al. 2003. The dynamics of soil microbial biomass nitrogen and its biological availability. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), **9**(1):87~90(in Chinese)
- 27 Wang Y(王岩), Shen Q-R(沈其荣), Shi R-H(史瑞和), et al. 1996. Soil microbial biomass and its ecological effects. *J Nanjing Agric Univ* (南京农业大学学报), **19**(4):45~51(in Chinese)
- 28 Wang Z-H(王忠华), Ye Q-F(叶庆富), Shu Q-Y(舒庆尧), et al. 2002. Impact of root exudates from transgenic plants on soil microecosystems. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **13**(3):373~375(in Chinese)
- 29 Wang Z-M(王志明), Zhu P-L(朱培立), Huang D-M(黄东迈), et al. 2003. Straw carbon decomposition *in situ* in field and characteristics of soil biomass carbon turnover. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **40**(3):446~453(in Chinese)
- 30 Zhang C-E(张成娥), Liang Y-L(梁银丽). 2001. Effect of different amounts of nitrogen and phosphorus fertilizers applied on soil microbial biomass during corn growth periods. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), **9**(2):72~74(in Chinese)
- 31 Zhao L-P(赵兰坡), Jiang Y(姜岩). 1986. Discussion on measurements of soil phosphatase. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), **17**(3):138~141(in Chinese)
- 32 Zhou L-K(周礼恺), Zhang Z-M(张志明). 1980. Measurements of soil enzyme. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), **11**(5):37~38(in Chinese)
- 33 Zhou Z-B(周智彬), Li P-J(李培军). 2003. Ecological distribution of soil microorganism in artificial greenbelt in hinterland of Taklimakan Desert and their relations with soil factors. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(8):1246~1250(in Chinese)

作者简介 张电学,男,1968年生,副教授,博士生.主要从事土壤肥力与施肥、土壤资源管理教学与科研工作,发表论文20余篇. E-mail: zdxzjj@163.com

欢迎订阅 2006 年《生态学杂志》

《生态学杂志》(1982年创刊)是由中国生态学会主办、中国科学院沈阳应用生态研究所承办和科学出版社出版的学术期刊,亦是全国中文核心期刊,2001年入选中国期刊方阵.读者对象为从事生态学、生物学、地学、林农牧渔、海洋、气象、环保、经济、卫生和城建部门的科研、教学、科技工作者、有关决策部门的科技管理人员、大专院校师生和中学教师.

本刊主要刊登具有创新性的生态学研究论文以及有关专题的综述和评论,研究方法和新技术的应用,学术讨论与争鸣,国内外学术信息和动态,生态学论坛和生态学新书刊介绍等.

《生态学杂志》为A4开本,月刊,112页,每册定价40元,全年480元.国内外公开发行.国内邮发代号:8-161,全国各地邮局均可订阅.如未能在当地邮局订到,可与编辑部直接联系订阅.

地址:沈阳市文化路72号中国科学院沈阳应用生态研究所《生态学杂志》编辑部 邮编:110016

电话:024-83970394 通用网址:生态学杂志

传真:024-83970394 E-mail: cje@iae.ac.cn